

TESIS DEFENDIDA POR
MELISSA MAYORGA MARTÍNEZ
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Oscar Sosa Nishizaki

Director del Comité

Dra. Bertha Eugenia Lavaniegos Espejo

Miembro del Comité

Dr. Gilberto Gaxiola Castro

Miembro del Comité

Dr. Luis Zavala Sansón

Miembro del Comité

Dra. Bertha Eugenia Lavaniegos Espejo

*Coordinador del programa de posgrado
en Ecología Marina*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

Director de Estudios de Posgrado

30 de Septiembre de 2011

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ECOLOGÍA MARINA**

**PATRONES EN LOS MOVIMIENTOS HORIZONTALES Y VERTICALES
DEL TIBURÓN BALLENA (*Rhincodon typus*) Y SU RELACIÓN A
VARIABLES OCEANOGRÁFICAS**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

MELISSA MAYORGA MARTÍNEZ

Ensenada, Baja California, México, Septiembre del año 2011

RESUMEN de la tesis de **MELISSA MAYORGA MARTÍNEZ**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ECOLOGÍA MARINA. Ensenada, Baja California. Septiembre de 2011.

PATRONES EN LOS MOVIMIENTOS HORIZONTALES Y VERTICALES DEL TIBURÓN BALLENA (*Rhincodon typus*) Y SU RELACIÓN A VARIABLES OCEANOGRÁFICAS

Resumen aprobado por:

Dr. Oscar Sosa Nishizaki
Director de Tesis

El tiburón ballena (*Rhincodon typus*) es una especie altamente migratoria que se congrega de mayo a noviembre en Bahía de Los Ángeles, Baja California, México, y su presencia ha representado una oportunidad para el desarrollo del ecoturismo local para su avistamiento. Es una especie vulnerable y se conoce poco sobre su biología y ecología, por lo que el entendimiento de sus patrones de movimientos en el área y hábitats asociados es importante para su manejo. Se empleó la telemetría satelital con marcas tipo SPOT y marcas PAT para el análisis de los movimientos horizontales y verticales de los tiburones. En octubre 2009 en Bahía de Los Ángeles se marcaron dos tiburones ballena de sexo indeterminado de 6 m (tiburón 1) y 5.5 m (tiburón 2) de longitud total. Los tiburones mostraron comportamientos horizontales diferentes. El tiburón 1 permaneció dentro del Golfo de California y en 129 días recorrió una distancia de 2,026.05 km a una velocidad media de $1.2 \pm 1.1 \text{ km h}^{-1}$. El tiburón 2 salió del golfo y en 37 días recorrió una distancia de 2,388.11 km con una velocidad media de $3.1 \pm 1.8 \text{ km h}^{-1}$. No se encontraron relaciones lineales significativas entre la concentración de clorofila-*a*, y la temperatura superficial del mar con la velocidad promedio del movimiento horizontal de los tiburones. En la columna de agua ambos tiburones pasaron gran porcentaje de su tiempo entre 0-10 m. Sin embargo mientras se encontraron en el Golfo de California presentaron comportamientos significativamente diferentes (K-S, $D_{\max}=0.52$, $p<0.05$) entre la proporción de tiempo que pasaron en diferentes profundidades. Se observó que el tiburón 1 prefirió permanecer entre los 0-20 m y el tiburón 2 entre 50-150 m de profundidad. Las temperaturas ambientales que experimentaron fueron de 24-27°C para el tiburón 1 y 30-33 °C para el tiburón 2. No se observó una diferencia significativa entre las proporciones de tiempo que pasaron en diferentes temperaturas. Sin embargo el análisis espectral indicó que el tiburón 2 presentó un patrón cíclico de 24 h en sus movimientos verticales presentando cambios abruptos de la profundidad de inmersión durante el amanecer en regiones con grandes profundidades.

Palabras Clave: *Rhincodon typus*, telemetría satelital, Golfo de California.

ABSTRACT of the thesis presented by **MELISSA MAYORGA MARTÍNEZ** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in MARINE ECOLOGY. Ensenada, Baja California, Mexico September 2011.

VERTICAL AND HORIZONTAL MOVEMENT PATTERNS OF THE WHALE SHARK (*Rhincodon typus*) AND THEIR RELATIONSHIP WITH OCEANOGRAPHIC VARIABLES

The whale shark (*Rhincodon typus*) is highly migratory specie known to aggregate seasonally from May to November in Bahia de Los Angeles, Baja California, Mexico. The presence of the whale sharks within the bay is an opportunity for the ecotourism development by the local community. Understanding whale shark movement patterns in this area and associated habitats is important for the specie management. Satellite telemetry was used to track the horizontal movements with SPOT tags and for the vertical movements with PAT tags. In October 2009 we tagged two whale sharks of undetermined sex, with 6 m (Shark 1) and 5.5 m (Shark 2) total length. The sharks showed two different behaviors for their horizontal movement. Shark 1 stayed within the Gulf of California traveling a total distance of 2,026.05 km during 129 days, with a mean speed of 1.2 ± 1.1 km h⁻¹. Shark 2 left the gulf and travelled a distance of 2,388.11 km in 37 days with a mean speed of 3.1 ± 1.8 km h⁻¹. No relationship was found between the chlorophyll-*a* concentration and sea superficial temperature (SST) with the mean horizontal movement speed. During vertical movements both sharks spent most of their time within the 0-10 m depth. However they showed significant different (K-S, $D_{\max}=0.52$, $p<0.05$) behaviors while they were in the Gulf of California between the proportions of time spent at different depths. Shark 1 spent most of its time between 0-20 m depth and shark 2 spent most of its time at greater depths between 50-150 m. Temperature at which most time was spent was 24-27 °C for Shark 1 and 30-33 °C for Shark 2. No significant differences were found between the proportions of time the sharks spent at different temperatures. However a spectral analysis revealed that Shark 2 had a cyclic pattern with a 24 h periodicity on vertical movements related to an abrupt change of dive depth during sunrise in deep areas.

Keywords: *Rhincodon typus*, Satellite telemetry, Gulf of California.

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Oscar Sosa Nishizaki, por abrirme las puertas del Laboratorio de Ecología pesquera y hacer posible el desarrollo de esta tesis, por todo el apoyo que me brindó estos dos años, por las aportaciones a mi trabajo, por su confianza, paciencia y enseñanzas. Gracias Dr. Sosa por haber sido mi guía y amigo, porque “el laboratorio es como la mafia, una vez que entras ya no puedes salir”.

A la Dra. Bertha Eugenia Lavaniegos Espejo, por aceptar ser parte de mi comité de tesis, porque sus comentarios y sugerencias fueron un gran aporte para este trabajo y sobre todo por su confianza y apoyo.

Al Dr. Luis Zavala Sansón, gracias por brindarme apoyo y orientación durante el desarrollo de tesis y por las sugerencias y comentarios que enriquecieron este trabajo.

Al Dr. Gilberto Gaxiola Castro, por aceptar ser parte de este comité y por sus valiosos comentarios y sugerencias que mejoraron esta tesis.

A CICESE y todo el personal que labora en esta institución y en especial al posgrado de ecología marina.

A CONACyT por haberme otorgado una beca (No. Registro 230268).

Al Dr. Horacio De la Cueva Salcedo, gracias por todas aquellas mañanas llenas de música, café, pláticas, sugerencias, enseñanzas, comida e infinidad de aportaciones a mi tesis y a mi persona. Pero sobre todo gracias por tu apoyo y sincera amistad.

Al M.C. Vicente Ferreira Bartrina, te agradezco infinitamente que hayas sido parte de mi formación académica, por las valiosas aportaciones a mi tesis y a mi persona. Mil gracias.

Al Oc. Saúl Geovanni Cordero Herrera, gracias por compartirme de tus conocimientos y por ser un gran maestro de SIG. Te agradezco infinitamente toda la atención y ayuda incondicional que me brindaste en los momentos más críticos, mientras yo perdía la calma tú fuiste parte de la solución.

A mis compañeros de laboratorio Omar, Erick, Emiliano, Mariela, César, Kena, Mata, Carmen y Reyna. Gracias a todos por su amistad y por todos los buenos momentos que compartimos en salidas de campo, en el laboratorio y fiestas. Por el cafecito en la mañana, por las horas de relajamiento, por sus ánimos y apoyo. Son un gran equipo de trabajo y grandes amigos.

A Rebeca Zertuche, gracias por tu ayuda en “la talacha” de los datos de tesis, por tu sincera amistad y por el apoyo que nos ofreciste en Bahía de Los Ángeles, indudablemente tú formas parte de esta tesis.

A Laura Camacho, gracias morrita porque siempre estuviste en las buenas y en las malas, por tú apoyo incondicional que me brindaste, por ser una amiga noble y sincera y por todas las risas y tristezas que compartimos, nada hubiera sido igual sin ti, te quiero mucho.

A mi amigo el físico Abimael Salcedo “el mijitus”, gracias por enseñarme a usar el MATLAB, por tu incondicional ayuda, paciencia y por tu sincera amistad.

A Emiliano García (emigarci), Francisco del Toro (paco el guapo) y Mariela Brito, gracias por su sincera amistad, por haber estado siempre ahí cuando más los necesité, por todos los buenos momentos y por todas esas noches de pisteadas “leves” que compartimos, los quiero mucho.

A mis amigos Efraín, Luis, Ana Lucía, José Abraham, Laura, Liliana, Jairo, Leonardo, Lupe y todos los amigos cicesianos de ecología marina, física aplicada, acuicultura, biotecnología, ciencias de la tierra y oceanografía física con los que compartí buenos y divertidos momentos durante esta etapa.

A mis compañeros y amigos de generación Daniela, Erik y Mariela, gracias por compartirme de sus conocimientos, por su paciencia, por todos los buenos momentos que compartimos estudiando, festeando “y así”.

A mis amigos-hermanos Gerardo, Lilia y Tanit, que siempre están conmigo incondicionalmente en cada paso que doy, porque su amor y su apoyo son aliento para continuar siempre adelante, siempre los llevo en mi corazón.

A Mariela Brito (Brito, Britny, Jarrito, etc.) gracias morrita por ser una gran roommate pero sobre todo una gran amiga-hermana, gracias por tu paciencia, confianza, orientación, por todo lo que compartiste conmigo, conocimientos, consejos, risas, tristezas, desveladas, fiestas, gracias por estar en los momentos más difíciles y por haber hecho posibles muchas cosas, nada hubiera sido lo mismo sin ti. Te quiero mucho.

A mis cariñosos padres Mario y Blanca, gracias por ser el pilar de mi vida, por todas sus enseñanzas, por su amor y apoyo incondicional, por ser siempre mi aliento y motivación para seguir adelante, porque siempre están ahí para ayudarme a cumplir mis metas e impulsarme a ser mejor cada día, los amo.

A mis hermanos Mariana y Mario Antonio, gracias por ser siempre mi ejemplo a seguir, que aunque pasan los años siempre son mis hermanos mayores que me cuidan y protegen, que hacen posible lo imposible, gracias hermanos por su amor incondicional.

A mis sobrinos Mario, Máximo y Luciano, por ser las personitas que convierten los días más tormentosos en una noche tranquila y estrellada con dulces, juegos y risas.

Agradezco a Dios por todas las bendiciones y por permitirme cumplir una meta más en mi vida.

CONTENIDO

	Página
Resumen español	i
Resumen inglés	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	vi
Lista de Figuras	viii
Lista de Tablas	xii
I. Introducción	1
I.1 Biología y ecología del tiburón ballena.....	1
I.2 Distribución y movimientos.....	2
I.3 Justificación.....	7
II. Hipótesis	9
III. Objetivos	10
IV. Método y materiales	11
IV.1 Área de marcaje.....	11
IV.2 Descripción de marcas satelitales.....	13
IV.3 Marcaje.....	16
IV.4 Análisis de los movimientos horizontales.....	18
IV.5 Análisis de los movimientos verticales.....	20
V. Resultados	22
V.1 Descripción de los movimientos horizontales con base en imágenes de clorofila-a.....	22
V.2 Relación entre el movimiento horizontal y variables oceanográficas	32
V.3 Descripción de los movimientos verticales.....	37

CONTENIDO (CONTINUACIÓN)

	Página
V.4 Descripción y comparación de la actividad en los movimientos verticales de los tiburones.....	42
V.5 Descripción y comparación de la actividad en los movimientos verticales entre tiburones en el Golfo de California.....	45
V.6 Descripción detallada de los movimientos verticales del Tiburón del Golfo de California.....	48
VI. Discusión.....	55
VII. Conclusiones.....	62
VIII. Referencias.....	63

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Distribución mundial del tiburón ballena (<i>Rhincodon typus</i>) (tomado de Compagno, 2002).....	2
Figura 2. Seguimiento de los movimientos horizontales de 4 tiburones ballena equipados con marcas satelitales en el Golfo de California (tomado de Eckert y Stewart, 2001).....	5
Figura 3. Ubicación y batimetría (m) de Bahía de Los Ángeles, Baja California, México. Se señalan las islas más destacadas de la Bahía (Coronado, Piojo, Ventana y Cabeza de Caballo), así como los extremos de la Bahía, al Norte La gringa y al Sur Punta Roja.....	12
Figura 4. Marca transmisora de la posición geográfica en tiempo real y temperatura (SPOT).....	14
Figura 5. Marca archivadora con transmisión al liberarse (PAT).....	16
Figura 6. Tiburón ballena equipado con una marca SPOT, señalada dentro del círculo amarillo.....	17
Figura 7. Marca PAT insertada en la musculatura de la base de la aleta dorsal del tiburón ballena, señalada dentro del círculo amarillo.....	18
Figura 8. Recorrido del tiburón 1 con 384 registros de las posiciones geográficas (círculos rojos) en un periodo de 129 días, sobre la batimetría (m) del área.....	26
Figura 9. Recorrido del tiburón 1 sobre imágenes diarias de la concentración de clorofila-a (mg m^{-3}) del 17 de octubre de 2009 a 17 de enero de 2010.....	27
Figura 10. Recorrido total del tiburón 2. La línea negra punteada muestra los 129 días de seguimiento. El recorrido efectivo está representado con 63 posiciones geográficas (círculos amarillos) correspondientes a un periodo de 37 días, sobre la batimetría del área.....	30
Figura 11. Recorrido del tiburón 2 sobre imágenes diarias de la concentración de clorofila-a (mg m^{-3}) del 17 de octubre al 23 de noviembre de 2009.....	31

LISTA DE FIGURAS (CONTINUACIÓN)

	Página
Figura 12. Velocidad de movimiento km h^{-1} (triángulos blancos) del “Tiburón del Golfo de California” y la concentración de clorofila-a mg m^{-3} (círculos grises) durante su trayectoria (km).....	32
Figura 13. Relación entre el Ln Clorofila-a (mg m^{-3}) y la Velocidad de movimiento (km h^{-1}) del Tiburón del Golfo de California.....	33
Figura 14. Velocidad de movimiento km h^{-1} (triángulos blancos) del “Tiburón del Golfo de California” y la TSM $^{\circ}\text{C}$ (círculos grises) durante su trayectoria (km).....	34
Figura 15. Relación lineal entre la TSM $^{\circ}\text{C}$ y la velocidad de movimiento horizontal km h^{-1} del “Tiburón del Golfo de California”.....	34
Figura 16. Velocidad de movimiento km h^{-1} (triángulos blancos) del “Tiburón del Pacífico” y la concentración de clorofila-a mg m^{-3} (círculos grises) durante su trayectoria (km).....	35
Figura 17. Relación entre el Ln de la concentración de Clorofila-a (mg m^{-3}) y la velocidad de movimiento (km h^{-1}) del Tiburón del Pacífico.....	36
Figura 18. Velocidad de movimiento km h^{-1} (triángulos blancos) del “Tiburón del Pacífico” y la TSM $^{\circ}\text{C}$ (círculos grises) durante su trayectoria (km).....	36
Figura 19. Relación lineal entre la Temperatura Superficial del Mar ($^{\circ}\text{C}$) y la velocidad de movimiento horizontal del “Tiburón del Pacífico”.....	37
Figura 20. Se presenta el recorrido del tiburón del Golfo de California del 17 de octubre de 2009 al 6 de enero de 2010 (círculos grises). La marca PAT inició el registro de los movimientos verticales en Bahía de Los Ángeles (asterisco en rojo) y se liberó e inició la transmisión de información al noreste de Bahía de La Paz (asterisco en negro). Se presentan las posibles posiciones geográficas de la posible deriva de la marca SPOT del 7 al 17 de enero (círculos blancos).....	38
Figura 21. Histogramas de (a) tiempo-profundidad y (b) tiempo-temperatura del Tiburón del Golfo de California.....	39

LISTA DE FIGURAS (CONTINUACIÓN)

	Página
Figura 22. Se presenta el recorrido del Tiburón Pacífico correspondiente a 37 días (en círculos negros). La marca PAT inició el registro de los movimientos verticales en Bahía de Los Ángeles (en rojo) y se liberó e inició la transmisión de información en el Pacífico Tropical cercano a la costa de El Salvador (asterisco en negro).....	40
Figura 23. Histogramas de (a) tiempo-profundidad y (b) tiempo-temperatura del Tiburón del Pacífico.....	23
Figura 24. Histogramas de (a) tiempo-profundidad y (b) tiempo-temperatura día/noche del Tiburón del Golfo de California.....	43
Figura 25. Histogramas de (a) tiempo profundidad y (b) tiempo-temperatura día/noche del Tiburón del Pacífico.....	44
Figura 26. (a) Imagen de los recorridos de ambos tiburones mientras se encontraron dentro del Golfo de California. Histogramas de (b) tiempo-profundidad y (c) tiempo-temperatura del Tiburón del Golfo de California (barra gris) y el Tiburón del Pacífico (barra negra).....	46
Figura 27. Histogramas de (a) tiempo-profundidad y (b) tiempo temperatura día/noche del Tiburón del Golfo de California de un periodo de 81 días.....	47
Figura 28. Histogramas de (a) tiempo-profundidad y (b) tiempo temperatura día/noche del Tiburón del Pacífico, de un periodo de 12 días.....	47
Figura 29. Se presenta (a) el perfil de profundidad (m) y temperatura (°C) diario y (b) la trayectoria del Tiburón del Golfo de California Se señala el inicio (asterisco rojo) y la terminación del seguimiento de los movimientos verticales. Las secciones A, B, C, D y E delimitadas en ambas figuras representan un seguimiento de movimientos horizontales y verticales de 81 días (del 17 de octubre de 2009 al 6 de enero de 2010). La sección F (del 7 de enero al 17 de enero) se presenta con signos interrogatorios, debido a que no se tiene claro el área donde el tiburón realizó los movimientos verticales correspondientes a este periodo.....	50

LISTA DE FIGURAS (CONTINUACIÓN)

	Página
Figura 30. En las columnas (1) se presentan los perfiles de inmersión de registros de la profundidad (m) en intervalos de 10 segundos; (2) el promedio de la profundidad de inmersión por hora del día. El área blanca representa las horas luz, delimitada a la izquierda por el amanecer y a la derecha por el atardecer. El área gris representa las horas de noche; (3) espectro de frecuencia de profundidades en intervalos de 10 segundos. Los renglones representan las secciones del recorrido del tiburón (exceptuando sección E).....	53

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla I. Estudios sobre movimientos horizontales y verticales del tiburón ballena empleando telemetría acústica* y satelital. Se presenta el registro del número de individuos marcados (n), seguimiento máximo (días), distancia máxima recorrida (km), profundidad máxima de la inmersión (m), temperatura mínima y máxima experimentadas (°C) y el registro de la velocidad promedio de movimiento mínima y máxima (km h ⁻¹) por estudio.....	3
Tabla II. Clasificación de la clase o el nivel de calidad del mensaje de la posición geográfica, el tipo de ubicación (Argos o GPS), el error estimado (m) y el número de mensajes recibidos por satélite.....	14
Tabla III. Datos sobre la talla de los tiburones marcados y sitios de marcaje dentro de Bahía de los Ángeles (coordenadas geográficas). Se indican los números correspondientes de la marca SPOT y PAT de cada tiburón.....	17

I. Introducción

I.1 Biología y ecología del Tiburón ballena

El tiburón ballena (*Rhincodon typus*) es el pez más grande del mundo. Pertenece al orden de los Orectolobiformes y es la única especie de la familia Rhincodontidae. Esta especie llega a medir al menos 12 m y puede alcanzar hasta 20 m de longitud total en su madurez. Se caracteriza por presentar una cabeza ancha y aplanada, una boca amplia, hendiduras branquiales grandes, la primera aleta dorsal de gran tamaño, una aleta caudal de forma semi-lunar y un patrón de coloración único de manchas claras que contrastan con rayas horizontales y verticales de color azulado o grisáceo (Compagno, 2002).

El tiburón ballena conforma el grupo de los grandes tiburones filtradores en el mundo junto con el tiburón peregrino (*Cetorhinus maximus*) y el tiburón bocón (*Megachasma pelagios*). Se caracterizan por alimentarse filtrando grandes cantidades de agua sobre sus branquias adaptadas y especializadas para capturar organismos planctónicos (Compagno, 2002). Particularmente el tiburón ballena se alimenta de una variedad de presas planctónicas y nectónicas las cuales incluyen eufáusidos, larvas de crustáceos, copépodos, huevos de teleósteos y presas de mayor tamaño como sardinas, anchovetas, macarelas y ocasionalmente de calamares (Colman, 1997; Heyman, 2001; Compagno, 2002).

El tiburón ballena se distribuye en todos los océanos del mundo encontrándose en aguas cálidas y templadas entre los 30° N y 45° S, a excepción del mar mediterráneo (Figura 1). Es una especie altamente migratoria que presenta un hábito costero y epipelágico y que forma congregaciones temporales en diversas regiones las cuales están asociadas a eventos locales de productividad. Algunas localidades donde ocurren estos eventos son Arrecife Ningaloo, Australia (Taylor,

1996; Colman, 1997), Gladden Spit, Belice (Heyman *et al.*, 2001), Golfo de California, Mar Caribe, México (Eckert y Stewart, 2001; Nelson y Eckert, 2007; Motta *et al.*, 2010), Seychelles (Rowat *et al.* 2006), KwaZulu-Natal, África (Cliff *et al.*, 2007; Stevens, 2007).

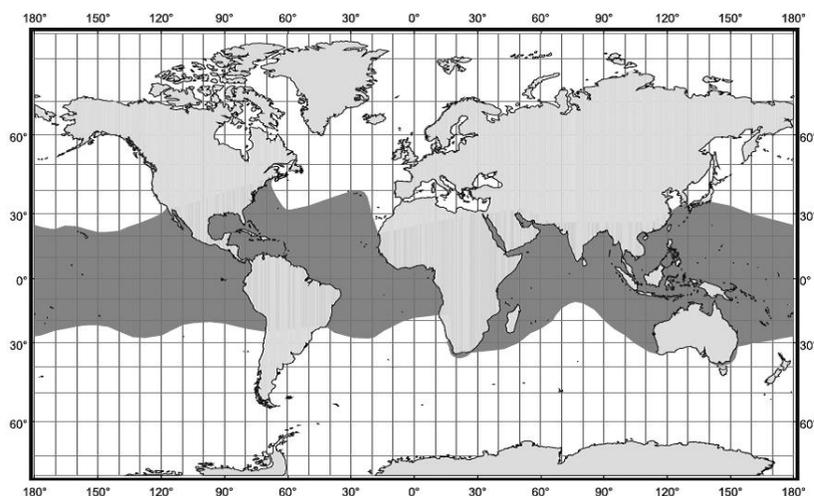


Figura 1. Distribución mundial del tiburón ballena (*Rhincodon typus*) (tomado de Compagno, 2002).

I.2 Distribución y movimientos

Debido a que el tiburón ballena es una especie altamente migratoria, las observaciones directas y detalladas sobre sus movimientos a largo plazo han sido difíciles, desde una perspectiva logística y económica, lo que ha limitado el conocimiento sobre su biología y ecología (Martin, 2007). No obstante, la descripción de su distribución y movimientos se ha fundamentado principalmente en registros de avistamientos (Colman, 1997; Jonahson y Harding, 2007), varamientos (Beckley *et al.*, 1997; Speed *et al.*, 2008) y capturas en las pesquerías (White y Cavanagh, 2007; Riley *et al.*, 2009).

Los sitios de agregación del tiburón ballena han brindado la oportunidad de realizar diversos estudios sobre la especie. En los últimos diez años se ha incrementado el estudio de los movimientos y comportamiento del tiburón ballena apoyado por la disponibilidad de técnicas especializadas como la telemetría acústica y satelital (Tabla I).

Tabla I. Estudios sobre movimientos horizontales y verticales del tiburón ballena empleando telemetría acústica* y satelital. Se presenta el registro del número de individuos marcados (n), seguimiento máximo (días), distancia máxima recorrida (km), profundidad máxima de la inmersión (m), temperatura mínima y máxima experimentadas (°C) y el registro de la velocidad promedio de movimiento mínima y máxima (km h^{-1}) por estudio.

Referencia	Sitio de marcaje	n	Seguimiento máximo (días)	Distancia máxima recorrida (km)	Inmersión máxima (m)	T°C (mín-max)	Vel. Km h^{-1}
Gunn et al. (1999)*	Arrecife Ningaloo, Australia	4	26 h	-	>70	-	0.5 - 0.7 m/s^{-1}
Eckert y Stewart (2001)	Golfo de California	19	1,144	12,620	>240	10-32	0.08-1.2
Eckert et al. (2002)	Sureste de Asia (mar de Sulu)	6	128	8,025	-	-	0.43-0.98
Graham et al. (2006)	Gladden Spit, Belice	9	206	-	>980	4.4-30.8	-
Wilson et al. (2006)	Arrecife Ningaloo, Australia	19	203	1,501	980	2.2-28.7	1.08
Gifford et al. (2007)	Cabo Vidal, Sudáfrica y Bahía Utila, Honduras	5	132	-	>320	-	-
Rowat y Gore (2007)	Seychelles	9	60	3,382.62	1000	4 - 23.8	0.9 - 2.9
Hsu et al. (2007)	Don-Ao, Taiwán	4	208	5,896	-	32	1.18-1.4
Brunnschweiler et al. (2009)	Mozambique, Sudáfrica	2	87	1,200	1,286	3.4-29.9	0.0-6.1
Sleeman et al. (2010)	Arrecife Ningaloo, Australia	7	-	6,595.08	-	-	1.17-3.19

Gunn *et al.* (1999) estudiaron los movimientos verticales de cuatro tiburones ballena empleando telemetría acústica, en el Arrecife Nigaloo, Australia. El seguimiento más largo tuvo una duración de 26 h. En general, en este estudio se observó que los tiburones presentaron una tendencia de permanecer un mayor porcentaje de su tiempo en la superficie durante la noche y un mayor porcentaje de su tiempo en profundidades mayores a 70 m durante el día, patrón que puede estar relacionado con la disponibilidad de sus presas o la búsqueda de alimento.

El primer y único estudio en el que se empleó la telemetría satelital para estudiar los movimientos verticales y horizontales del tiburón ballena en el Golfo de California, lo realizaron Eckert y Stewart (2001) con 19 tiburones, en su mayoría hembras inmaduras, marcadas en Bahía de Los Ángeles y Banco Gorda. En general, observaron que el tiburón ballena es un nadador lento que se desplaza a una velocidad promedio de 1 km h^{-1} recorriendo grandes distancias. En este primer estudio también se observó que durante su recorrido experimenta temperaturas de 10 a 32 °C. Hasta ahora, este estudio registró el seguimiento más largo que fue de 1,144 días y el recorrido de mayor distancia con 12,620 km (Figura 2). En relación a sus movimientos verticales, los autores observaron que los tiburones realizaron inmersiones mayores a los 240 m de profundidad, sin embargo no observaron un patrón definido o alguna relación entre los movimientos verticales con la hora del día.

La alta movilidad del tiburón ballena descrita por Eckert y Stewart (2001) fue consistente con los resultados de Eckert *et al.* (2002) en el Mar de Sulu, ya que observaron que el tiburón ballena recorre al día una distancia promedio de 24.7 km y que es una especie altamente vágil. Por otra parte, ellos no observaron que los tiburones permanecieran en un área particular, por el contrario los individuos realizaron movimientos hacia diferentes sitios como Malasia, Vietnam y Filipinas. Cabe mencionar que en esta última región se realiza una actividad pesquera sobre la especie (White y Cavanagh, 2007; Riley *et al.*, 2009).

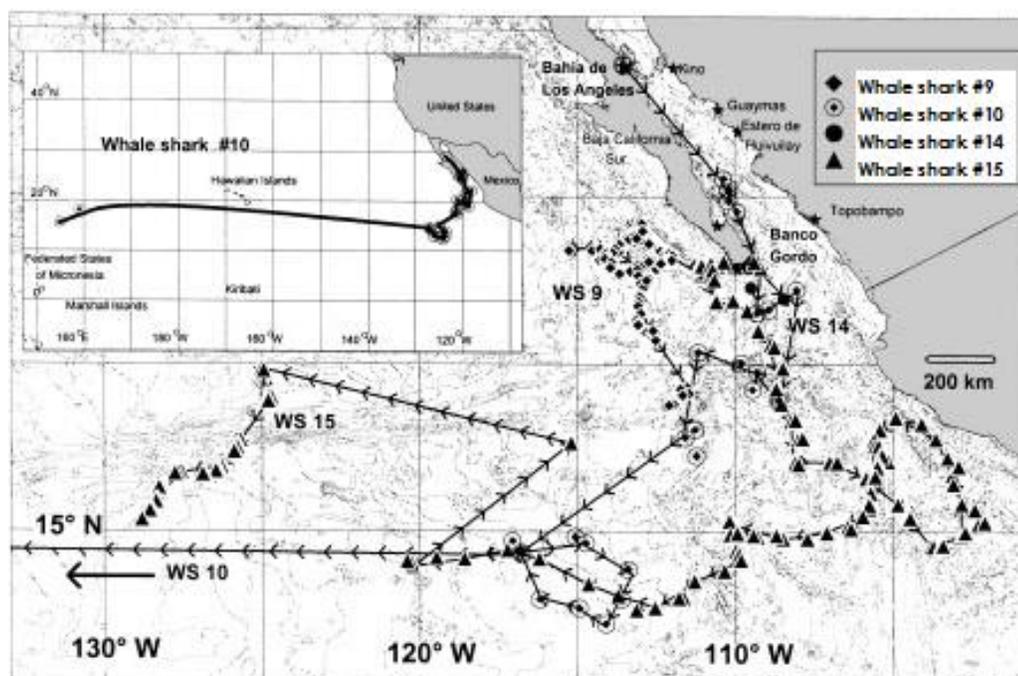


Figura 2. Seguimiento de los movimientos horizontales de 4 tiburones ballena equipados con marcas satelitales en el Golfo de California (tomado de Eckert y Stewart, 2001).

Wilson *et al.* (2006) en el arrecife Nigaloo si observaron un patrón en los movimientos verticales diarios en 12 de 19 tiburones ballena marcados con transmisores satelitales. Los tiburones permanecieron más del 40 % de su tiempo entre los 0-15 m de profundidad y más del 50% de su tiempo en profundidades mayores de 30 m. Las inmersiones más profundas las realizaron principalmente durante el día. Observaron cambios abruptos en los movimientos verticales durante el amanecer y el atardecer. También presentaron diferencias en el comportamiento en relación a la región donde se encontraban, aumentando la profundidad de sus inmersiones a medida que se alejaban de la plataforma continental. Las inmersiones más profundas (>980 m) las realizaron en el océano abierto.

Graham *et al.* (2006) observaron una relación entre los movimientos verticales de cuatro tiburones ballena y el desove de los peces *Lutjanus cyanopterus* y *Lutjanus jocu* en Gladden Spit, Belice, evento estrechamente relacionado a los periodos lunares. Los autores observaron que la actividad en los movimientos verticales de los tiburones fue consistente con los periodos de desove, sin embargo los movimientos verticales de los tiburones no estuvieron relacionados a las fases lunares. Los tiburones disminuyeron sus desplazamientos verticales cuando se presentaron los desoves y permanecieron principalmente en la superficie. Por el contrario, aumentaron los desplazamientos verticales cuando no se presentaron los desoves. Por otra parte, el análisis de la Transformada de Fourier que los autores realizaron con información sobre la profundidad de los movimientos verticales de un tiburón, reveló la existencia de tres componentes espectrales con periodicidades de 24, 8 horas y 45 minutos. La periodicidad de 24 horas fue la más fuerte y consistente con las inmersiones profundas que el tiburón realizó en el amanecer. Las periodicidades de 8 horas y 45 minutos fueron más débiles. Los autores no encontraron una explicación clara para la periodicidad de 8 horas. La periodicidad de 45 minutos parece estar relacionada con un patrón de movimientos verticales oscilatorio que el tiburón realizó alrededor de los 300 m de profundidad.

En relación a los movimientos horizontales ha sido más complicado encontrar un patrón definido. Hsu *et al.* (2007) realizaron un seguimiento en tres tiburones ballena machos inmaduros, marcados en Don-Ao, Taiwán, en el cual emplearon información sobre la batimetría, temperatura superficial del mar y concentración de clorofila-a como indicador de alta productividad, contenida en imágenes satelitales mensuales. En general los autores observaron dos patrones de comportamiento, ya que dos de los tiburones se dirigieron y permanecieron en el océano abierto. Sin embargo no encontraron una relación de estos movimientos con las variables oceanográficas mencionadas. En contraste, el tercer tiburón se dirigió a sitios donde la concentración superficial de clorofila-a era evidentemente alta y

observaron una compatibilidad del recorrido con las montañas submarinas de Yaeyama y Gagua, región donde se registran altas concentraciones de ictioplancton. Hsu *et al.*, (2007) sugirieron que los movimientos horizontales están relacionados a surgencias y frentes termales que ocurren en esta región del Kuroshio.

Por lo consiguiente, la telemetría satelital es una herramienta útil en el rastreo global de los movimientos del tiburón ballena en comparación con otras técnicas en las cuales se requiere de mayor esfuerzo de tiempo para acumular información, además de ser la única técnica disponible hasta ahora que provee datos sobre los movimientos en la columna de agua del tiburón en tiempo real (Gifford *et al.* 2007).

1.3 Justificación

El avistamiento del tiburón ballena se ha tornado una actividad económica importante en algunos de los sitios donde se congrega. Esta actividad eco-turística se ha popularizado gracias a que el tiburón ballena es considerado como una especie carismática (Dobson, 2008). La Reserva de la Biosfera de Bahía de los Ángeles (D.O.F, 2007) es uno de los pocos lugares en el mundo en donde el tiburón ballena puede ser observado por un periodo largo de tiempo. La temporada de avistamiento es de mayo a noviembre (Enríquez-Andrade *et al.*, 2003) y la presencia de esta especie ha representado una oportunidad para el desarrollo económico de esta localidad (Cárdenas-Torres *et al.*, 2007). Actualmente el conocimiento detallado sobre la biología y ecología del tiburón ballena en esta región es aún escaso. El comprender claramente los patrones de sus movimientos y el uso del hábitat por la especie (Martin, 2007) es crítico para el entendimiento de su ecología (Block *et al.*, 2001; Hammerschlag *et al.*, 2011) y para realizar un mejor manejo de las actividades socio-económicas relacionadas a la especie.

Aunado a su importancia económica, el tiburón ballena se incluye en la Lista Roja de especies amenazadas, categorizada como una especie vulnerable por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) (Norman, 2005). En México está categorizada como una especie amenazada por la NOM-059-SEMARNAT-2001 y su pesca está prohibida por la NOM-029-PESC-2006. No obstante, debido a que esta especie es altamente migratoria, puede pasar de un lugar donde está protegida o bajo conservación a lugares donde puede llegar a ser objetivo de la pesca o ser capturada incidentalmente (Eckert *et al.*, 2002; Meekan *et al.*, 2006). Por lo tanto, la descripción de los movimientos horizontales y verticales del tiburón ballena a lo largo de su distribución en aguas mexicanas, permitirá describir los lugares en donde existen riesgos potenciales para esta especie.

En el presente trabajo se hace uso del marcaje satelital para describir los patrones de movimiento de dos tiburones ballena marcados en Bahía de los Ángeles, en la parte central del Golfo de California. Los resultados se discuten en relación a variables oceanográficas de la región del Golfo de California y Pacífico Tropical.

II. Hipótesis

1. Considerando la concentración de clorofila-a como un indicador de productividad biológica, se espera que a mayores concentraciones superficiales de clorofila-a la velocidad de movimiento horizontal del tiburón ballena sea menor y por el contrario que a menores concentraciones de clorofila-a la velocidad de movimientos horizontal del tiburón ballena sea mayor.
2. Considerando que el tiburón ballena presenta una periodicidad en sus movimientos verticales relacionada al fotoperiodo, se espera encontrar que durante el día los movimientos verticales sean profundos y frecuentes, por el contrario se espera que durante la noche el tiburón disminuirá la profundidad y frecuencia de sus movimientos verticales.

III. Objetivos

Objetivo general

Establecer la relación de los movimientos horizontales del tiburón ballena (*Rhincodon typus*) con variables oceanográficas y describir los patrones en los movimientos verticales para contribuir al conocimiento sobre su comportamiento y ecología en el golfo de California y Pacífico Tropical.

Objetivos particulares

1. Describir los movimientos horizontales y verticales de individuos de tiburón ballena en el Golfo de California y Pacífico Tropical.
2. Relacionar los movimientos horizontales de individuos de tiburón ballena con información sobre la concentración de clorofila-*a* y la temperatura superficial del mar.
3. Comparar la frecuencia de los movimientos verticales de individuos de tiburón ballena en función del fotoperiodo (día/noche).
4. Detectar si existen patrones en los movimientos verticales del tiburón ballena en el Golfo de California.

IV. Material y métodos

IV.1 Área de marcaje

El punto de partida fue Bahía de Los Ángeles, la cual está situada en la costa oriental de Baja California entre los 29°00'N y 113°30'W. Es una bahía abierta hacia el Golfo de California, sus dimensiones son de 16 km de largo por 6.4 km en su parte más ancha y tiene una orientación de Noroeste a Sureste (Figura 3). Bahía de los Ángeles se encuentra en un área de clima desértico con escasa precipitación y alta evaporación todo el año, además tiene un sistema de vientos dominantes con una marcada variación estacional (Amador-Buenrostro *et al.*, 1991).

Es una bahía relativamente somera (10-40 m) cuya profundidad máxima es de 100 m. Presenta un amplio intercambio de agua con el Canal de Ballenas originado por la amplitud de la boca y su orientación con respecto a los vientos dominantes. Estos provocan flujos paralelos a la costa que recorren gran parte de la bahía. En general el flujo de agua presenta dos entradas, la primera es el Canal Norte entre La Gringa e Isla Ventana y la segunda es el Canal Sur entre Punta Roja e Isla Cabeza de Caballo. En invierno los vientos dominantes provienen del Norte y Noroeste y hacen que el flujo de agua entre por el Canal Norte y salga por el Canal Sur. En verano los vientos dominantes se invierten induciendo un flujo de agua que entra por el Canal Sur y tiene salida por el Canal Norte y entre las Islas Ventana y Cabeza de Caballo (Amador-Buenrostro *et al.*, 1991).

El Canal de Ballenas es una región localizada en la Región de las Grandes Islas en el Golfo de California, entre la costa peninsular e Isla Ángel de la Guarda. Presenta una topografía compleja con profundidades que van desde 100 hasta ~1600 m de profundidad y se encuentra aislado por una cordillera submarina (450 m de profundidad). El agua de Canal de Ballenas es el resultado de la mezcla

intensa de aguas superficiales y aguas provenientes de la base de la cordillera. En esta región se presentan intensas corrientes de marea que propician un patrón de circulación similar al de una surgencia persistente (Álvarez-Borrego, 2010).

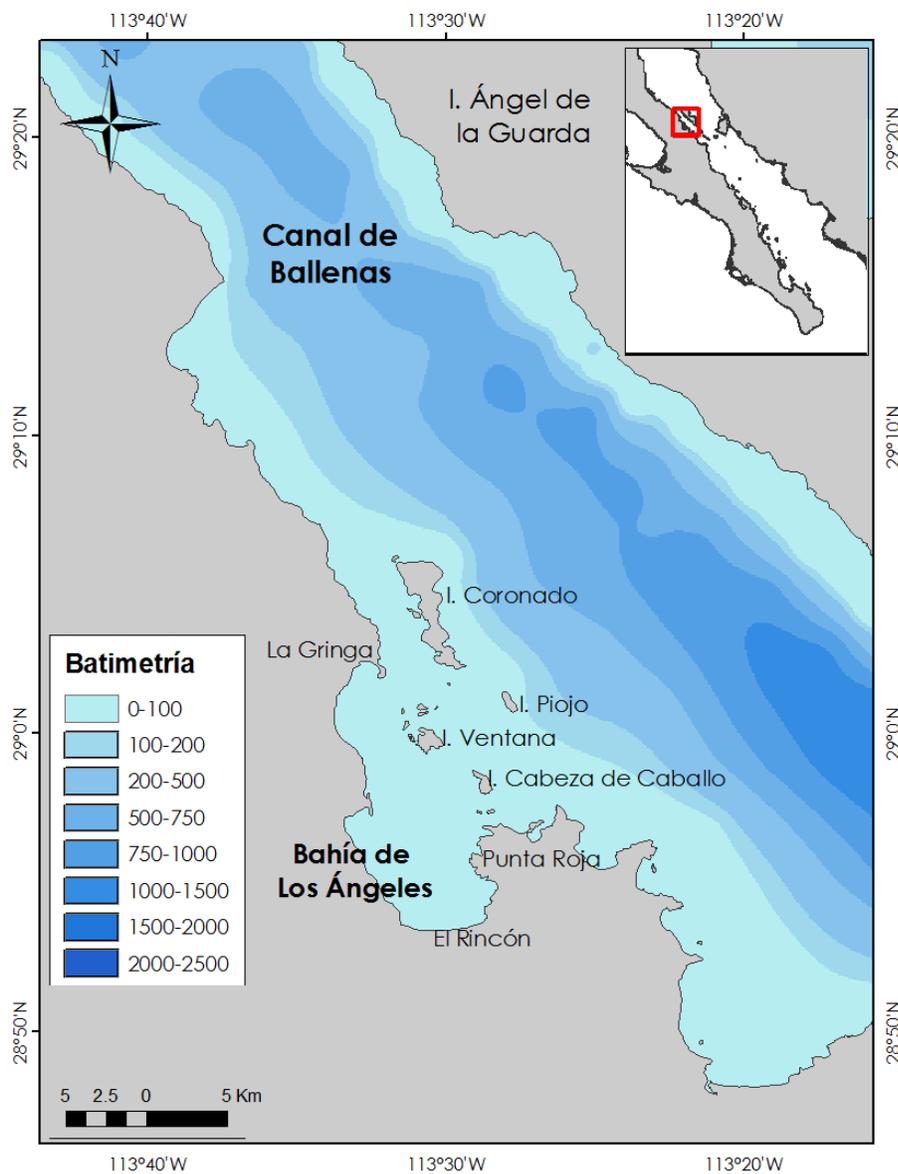


Figura 3. Ubicación y batimetría (m) de Bahía de Los Ángeles, Baja California, México. Se señalan las islas más destacadas de la Bahía (Coronado, Piojo, Ventana y Cabeza de Cavallo), así como los extremos de la Bahía, al Norte La gringa y al Sur Punta Roja.

IV.2 Descripción de las marcas satelitales

En este estudio se emplearon marcas tipo SPOT (marca transmisora de temperatura y posición en tiempo real) para el seguimiento y obtención de la información sobre los movimientos horizontales y marcas tipo PAT (marca archivadora con transmisión al liberarse) para el seguimiento y obtención de la información sobre los movimientos verticales, preferencias ambientales en términos de temperatura y profundidad, ambas marcas de la compañía Wildlife Computers©.

Marcas transmisoras de temperatura y posición en tiempo real

La marca SPOT es un pequeño transmisor en tiempo real de Argos, el cual posee un sensor que mide la temperatura de -40°C a $+60^{\circ}\text{C}$ con una precisión de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ y la transmite de manera opcional. También posee un sensor que por conductividad detecta si el ambiente está “húmedo” o “seco” y un reloj interno que tiene la función de mantener el seguimiento de cuando una transmisión debe realizarse (Figura 4).

En este estudio las marcas SPOT no fueron programadas para registrar información sobre la temperatura, sin embargo se programaron para que cada 0.25 segundos el reloj monitoreara el sensor “húmedo-seco”. Una vez que el sensor indicó una condición “seca”, quiere decir que la SPOT alcanzó llegar a la superficie, se inició una transmisión sobre la posición geográfica al sistema satelital Argos y se retransmitió a los sistemas Argos en tierra.

Las posiciones geográficas fueron proporcionadas por el servicio Argos. Cada una presentó una clase o un nivel de calidad clasificado bajo los criterios de: tipo de ubicación (Argos o GPS), el error estimado y el número de mensajes recibidos

durante la transmisión. El nivel o clase de la posición geográfica (G, 3, 2, 1, 0, A, B y Z) está basado sobre el radio de error (Tabla II).

Tabla II. Clasificación de la clase o el nivel de calidad del mensaje de la posición geográfica, el tipo de ubicación (Argos o GPS), el error estimado (m) y el número de mensajes recibidos por satélite.

Clase	Tipo	Error estimado			Número de mensajes recibidos por satélite		
		Mínimos cuadrados	Filtro Kalman	de	Mínimos cuadrados	Filtro Kalman	de
G	GPS	<100m					1 mensaje o más
3	Argos	<250m					4 mensajes o más
2	Argos	250 <		<500m			4 mensajes o más
1	Argos	500 <		<1500m			4 mensajes o más
0	Argos	>1500m					4 mensajes o más
A	Argos	No precisión estimada	hay	No precisión estimada	hay		3 mensajes
B	Argos	No precisión estimada	hay	No precisión estimada	hay	Mensajes	1 o 2 mensajes
Z	Argos	Ubicación inválida					



Figura 4. Marca transmisora de la posición geográfica en tiempo real y temperatura (SPOT).

Marcas archivadoras con transmisión al liberarse

La marca PAT tiene la capacidad de medir la temperatura de -40°C a $+60 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$, la profundidad de $0-1000 \pm 0.5$ m y el nivel de luz como irradiancia a una longitud de onda de 550nm de 5×10^{-12} a 5×10^{-2} W cm^{-2} (Figura 5). El nivel de luz es empleado para estimar la latitud y longitud diaria del individuo, y así obtener información sobre sus posiciones geográficas. Además la marca PAT cuenta con un sistema de liberación a una fecha predefinida, el cual consiste en la corrosión activa del broche al que está sujeto el cable de la marca, una vez que la marca PAT es liberada, emerge a la superficie y transmite información resumida a través del Sistema Satelital Argos. En este estudio las marcas PAT fueron configuradas para registrar información sobre la profundidad, temperatura y nivel de luz en intervalos de 10 segundos y liberarse del individuo el 17 de enero de 2010.

La información resumida que transmitieron las marcas PAT una vez que se liberaron, consistió en mensajes en forma de histogramas compuestos por el histograma de tiempo-profundidad e histogramas de tiempo-temperatura y por mensajes del perfil de profundidad y temperatura. Los histogramas de tiempo-profundidad y tiempo-temperatura se construyeron por el número de lecturas tomadas en intervalos de 10 segundos que cayeron dentro de los intervalos de profundidad (0-2, 2-10, 10-20, 20-50, 50-100, 100-150, 150-200, 200-300, 300-400, 400-500, 500-750, 750-1000 y >1000 m) y temperatura (-2 - 0 , 0 - 3 , 3 - 6 , 6 - 9 , 9 - 12 , 12 - 15 , 15 - 18 , 18 - 21 , 21 - 24 , 24 - 27 , 27 - 30 , 30 - 33 y $>33^{\circ}\text{C}$) configurados. Las marcas PAT se programaron para construir los histogramas con intervalos de 6 (PAT: 88759) y 3 horas (PAT: 88774) respectivamente.

Los mensajes del perfil de profundidad-temperatura fueron un resumen de la información sobre las profundidades mínimas y máximas registradas, seis profundidades equidistantes y sus temperaturas mínimas y máximas asociadas.

Se registraron sobre el mismo periodo de tiempo en el que se acumuló información de los histogramas.

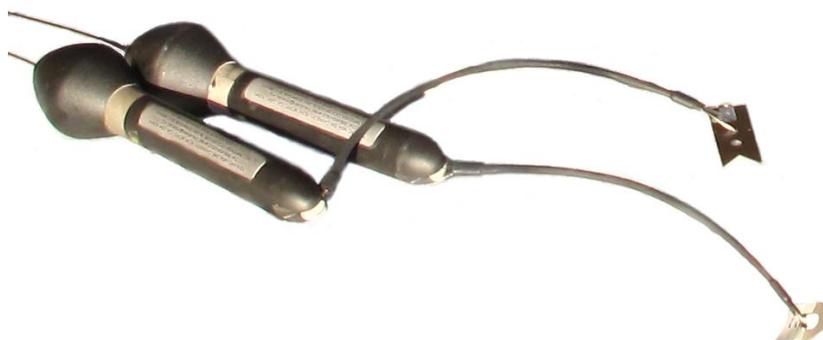


Figura 5. Marcas archivadoras con transmisión al liberarse (PAT).

IV.3 Marcaje

El 17 octubre de 2009 se equiparon dos tiburones ballena, cada uno con una marca SPOT y una PAT. Ambos fueron tiburones juveniles y de sexo indeterminado, cuyas tallas se estimaron mediante su comparación con respecto al tamaño de la embarcación. Se registraron las coordenadas geográficas del sitio de marcaje y los números identificadores de las marcas SPOT y PAT que se equiparon en cada tiburón (Tabla III).

El equipo completo de la SPOT consistió en un recubrimiento negro de poliolefina de 3/16 pulgadas retráctil al calor el cual aisló de la humedad al cable de 180 cm de longitud que sujetó la SPOT, un destorcedor de 150 libras de fuerza y un dardo de titanio. El equipo completo de la PAT consistió en un recubrimiento negro de poliolefina de 3/16 pulgadas retráctil al calor el cual aisló de la humedad el cable de 25 cm de longitud que sujetó a la PAT y un dardo de titanio. El material utilizado fue de la compañía McMaster Carr.

Para la aproximación y equipamiento de las marcas se empleó una embarcación y equipo básico de buceo. El marcaje consistió en insertar las marcas con un arpón en la musculatura de la base de la primera aleta dorsal (Figuras 6 y 7).

Tabla III. Datos sobre la talla de los tiburones marcados y sitios de marcaje dentro de Bahía de los Ángeles (coordenadas geográficas). Se indican los números correspondientes de la marca SPOT y PAT de cada tiburón.

	Tiburón 1	Tiburón 2
Talla (m)	6	5.5
Sitio de Marcaje	28°54'23.76" N	28°53'40.92" N
	113°31'39.68" W	113°29'53.51" W
No. SPOT	98784	98783
No. PAT	88774	88759



Figura 6. Tiburón ballena equipado con una marca SPOT, señalada dentro del círculo amarillo.



Figura 7. Marca PAT insertada en la musculatura de la base de la aleta dorsal del tiburón ballena, señalada dentro del círculo amarillo.

IV.4 Análisis de los movimientos horizontales

La descripción detallada de los movimientos horizontales y su relación lineal simple con variables oceanográficas se realizó con información obtenida de la marca SPOT sobre las posiciones geográficas de cada tiburón e información de la concentración de clorofila-*a* y Temperatura Superficial del Mar (TSM) que se obtuvo por medio de imágenes satelitales. A continuación se describen las cuatro etapas en las que se llevó a cabo este análisis.

La primera etapa consistió en el ordenamiento y procesamiento de la información obtenida de la marca SPOT. Se seleccionaron las posiciones geográficas que presentaron una calidad de mensaje de nivel 1, 2 y 3 (Tabla II). Se excluyeron las posiciones geográficas que presentaron mensajes de nivel 0, A, B y Z debido a que el error inherente es mayor a 1500 m. Se realizó una conversión de las coordenadas geográficas (grados, minutos y segundos) de las posiciones de los tiburones a coordenadas métricas UTM (Universal Transverse Mercator). Estas se

emplearon para generar una capa de información en el programa ArcGIS 9 / ArcMap 9.3.1 la cual proyectó los recorridos de cada tiburón en forma de mapas. Finalmente se estimaron las coordenadas UTM para las zonas UTM12, UTM13 y UTM14.

En la segunda etapa se construyeron los mapas sobre el recorrido de ambos tiburones y se estimaron las distancias (total, entre posiciones geográficas y la distancia más cercana de cada posición geográfica a la costa) y velocidades (entre posiciones geográficas, mínima, máxima, promedio y desviación estándar).

En la tercera etapa se descargaron del sitio web <<http://coastwatch.pfel.noaa.gov>> del sensor AquaMODIS imágenes satelitales diarias (tamaño de pixel de 0.025 grados) que contuvieron información sobre la concentración de clorofila-a y TSM (Temperatura Superficial del Mar), las cuales correspondieron a los 129 días (17 de octubre de 2009 al 23 de febrero de 2010) de seguimiento de los movimientos horizontales. Además se descargó de la base de datos ETOPO1 una imagen sobre la batimetría (tamaño de pixel de 0.0166667 grados) con la cual se complementó la descripción de los recorridos. Las imágenes comprendieron el área del Pacífico Mexicano.

Su ordenamiento y proyección se realizó en el ArcMap 9.3.1 donde se organizaron de manera cronológica. La escala de unidades se homogeneizó de 0.01 mg m^{-3} a 5 mg m^{-3} para la clorofila-a y de 24°C a 32°C para la TSM, así como la paleta de colores para tener una mejor visualización de la proyección de la imagen. Una vez que se ordenaron y procesaron las imágenes satelitales se integró la información sobre las posiciones geográficas de los recorridos de cada tiburón y se extrajeron los valores de la clorofila-a y TSM que representan el área de un pixel. Esto se hizo para cada una de las posiciones geográficas de los tiburones y su fecha correspondiente. Finalmente se seleccionaron sólo aquellas posiciones geográficas con valores efectivos de clorofila-a y TSM en horas luz, bajo el criterio

de la hora de amanecer y atardecer. Para discriminar las horas luz se utilizó el estimador solar del sitio web: <<http://www.srrb.noaa.gov/highlights/sunrise/sunrise.html>>.

En la cuarta etapa se realizó un análisis de regresión lineal simple entre el logaritmo natural de la clorofila-a y la velocidad de movimiento horizontal del tiburón ballena así como de la temperatura superficial del mar y la velocidad de movimiento del tiburón ballena. Se usó el programa STATISTICA versión 7.1.

IV.5 Análisis de los movimientos verticales

La descripción de los movimientos verticales y comparación entre la actividad de inmersión diurna y nocturna así como de las temperaturas asociadas se realizó con la información de los mensajes en forma de histogramas de tiempo-profundidad y tiempo-temperatura registrados en las marcas PAT de cada tiburón. La información sobre las proporciones de tiempo se separó con base a las horas de luz y oscuridad correspondiente al sitio donde los tiburones se distribuyeron, bajo el criterio del amanecer y atardecer mediante un estimador solar <<http://www.srrb.noaa.gov/highlights/sunrise/sunrise.html>>.

Se utilizó la prueba Kolmogorov–Smirnov para dos muestras independientes y se comparó la 1) la proporción de tiempo en horas de luz y oscuridad que los tiburones pasaron en los intervalos de profundidad y temperatura y 2) la proporción de tiempo en los intervalos de profundidad y temperatura para los dos tiburones durante su estancia en el Golfo de California.

Se utilizó la información contenida en el archivo completo de la marca PAT (No. 88774) correspondiente al tiburón 2 la cual se recuperó con éxito, para la descripción detallada y detección de patrones en los movimientos verticales.

Se realizó un análisis espectral utilizando la Transformada de Fourier para detectar patrones en los movimientos verticales del tiburón 2 y conocer la periodicidad con la que ocurre ese patrón, en el programa MATLAB versión 7.5.0.342 (R2007b). El análisis de la Transformada de Fourier descompone un conjunto de datos de series temporales en un espectro de constituyentes de componentes sinusoidales de diferentes frecuencias y por lo tanto de diferentes periodicidades. La varianza de cada periodicidad dentro de la serie de tiempo se presenta por la magnitud de la frecuencia correspondiente en el espectro de frecuencia (Frecuencia = $1 / \text{Periodo}$) (Lynn, 1973).

V. Resultados

V.1 Descripción de movimientos horizontales con base en imágenes de clorofila-a

Tiburón 1

Para el tiburón 1 (SPOT: 98784) se obtuvieron 397 registros totales de la posición geográfica, de los cuales 384 correspondieron a calidades de mensaje de nivel 1, 2 y 3, durante un periodo de seguimiento de 129 días, del 17 de octubre de 2009 al 23 de febrero de 2010 (Figura 8).

El tiburón 1 recorrió un total de 2,026.05 km, con una velocidad media de 1.2 ± 1.1 km h⁻¹, y velocidades mínima y máxima de 0.05 y 6.9 km h⁻¹ respectivamente. En general el recorrido del tiburón 1, mostró que una vez que salió de Bahía de los Ángeles se dirigió hacia el sur y realizó movimientos con dirección al noreste en Golfo de California donde se aproximó a la costa continental seguido de movimientos con dirección al suroeste del golfo y retornó a la costa peninsular. El seguimiento de los movimientos horizontales del Tiburón 1 terminó fuera del Golfo de California entre las coordenadas 22°35'16"N y 108°17'21"W.

Analizando la información por secciones, en los primeros seis días de seguimiento (del 17 al 23 de octubre) se observó que el primer día el tiburón 1 permaneció dentro de Bahía de los Ángeles. En el segundo día se dirigió y permaneció en el Canal de Ballenas y los cuatro días restantes se mantuvo a una distancia de 4.7 ± 1.5 km de la costa peninsular donde la profundidad máxima de esa región es de 750 m, hasta el norte de Santa Rosalía, Baja California Sur. Su presencia en la región de las grandes islas y cerca de la costa peninsular fue consistente con altas concentraciones de clorofila-a. Cabe mencionar que el día 20 de octubre se

observó una estructura de alta concentración de clorofila-a que se dispersó del norte de Santa Rosalía con dirección al noreste en el golfo, la cual perduró en menor concentración hasta el día 27 de octubre (Figura 9).

Entre el 24 de octubre y 2 de noviembre, el tiburón 1 se dirigió al noreste del Golfo de California, se aproximó a la costa oriental y cambió su dirección de movimiento al suroeste hasta que arribó en la costa occidental. Los movimientos que realizó entre el 24 y 30 de octubre con dirección al noreste, fueron compatibles con una estructura de alta concentración de clorofila-a que permaneció hasta el 27 de octubre. Entre el 29 y 30 de octubre el tiburón 1 permaneció más cercano a la costa oriental en todo el seguimiento de su trayectoria a una distancia promedio de 26.2 ± 5.8 km, así como también se encontró cercano a la Isla San Pedro Nolasco. El 31 de octubre se observó que las concentraciones de clorofila-a aumentaron en la costa de Bahía Concepción, Baja California Sur, simultáneamente se observó como el tiburón se dirigió al suroeste hacia esta región. Arribó el 2 de noviembre al norte de Bahía Concepción y permaneció a 12.2 ± 0.5 km de la costa peninsular en una región donde la profundidad máxima es de 500 m (Figura 9).

Entre el 3 y 16 de noviembre, el tiburón 1 realizó movimientos hacia el noreste seguido de movimientos al suroeste del Golfo de California. Entre el 3 y 9 de noviembre se retiró del Norte de Bahía Concepción y se dirigió al noreste. Entre los días del 10 al 16 de noviembre el tiburón 1 cambió la dirección de sus movimientos hacia el suroeste hasta que se aproximó a la costa occidental al Sur de Bahía Concepción, sitio donde a partir del 16 de noviembre presentó una alta concentración de clorofila-a. En el transcurso de sus movimientos se encontró en sitios donde la profundidad máxima era de 2000 m (Figura 9).

Entre el 17 de noviembre y el 22 de diciembre, el tiburón 1 se mantuvo cercano a la costa peninsular. Se observó que entre el 17 a 25 de noviembre permaneció a una distancia promedio de 3.7 ± 2.2 km de la costa peninsular, esta región está

caracterizada por presentar una profundidad máxima de 200 m. Mientras se encontró en esta área se observó que el 17 de noviembre disminuyó la concentración de clorofila-a y aumentó entre el 21 a 24 de noviembre. El día 26 de noviembre se observó que el tiburón 1 estuvo cercano a la Isla Carmen, sitio donde el 19 de noviembre presentó una alta concentración de clorofila-a (Figura 9).

Entre el 27 de noviembre y 16 de diciembre el tiburón 1 rodeó completamente la Isla Santa Catalina con dirección de suroeste a noreste. No se observaron estructuras de altas concentraciones de clorofila-a alrededor de la isla. Sin embargo, el día 12 de diciembre incrementó ligeramente la concentración de clorofila-a al norte de Isla San José y sobre la costa peninsular por los siguientes días. El 16 de diciembre se observó que esta estructura se distribuyó desde el Sur de la Isla Carmen hasta la Bahía de la Paz y rodeaba Isla San José. Entre el 17 a 20 de diciembre el tiburón 1 se dirigió hacia el sur y se aproximó a la costa Este de la Isla San José, ahí permaneció hasta el 22 de diciembre. Esta región presentó una profundidad de 100 m. Cabe mencionar que cuando el tiburón arribó a este sitio las altas concentraciones de clorofila-a habían disminuido (Figura 9).

Por otra parte se observó que una estructura de alta concentración de clorofila-a, rodeó a la Isla Cerralvo al sur de Bahía de La Paz y se dispersó hacia el noreste en el interior del Golfo de California, la cual disminuyó el 27 de diciembre y desapareció el 30 de diciembre (Figura 9).

El tiburón 1 se dirigió al noreste a la parte central del Golfo de California y regresó a la costa peninsular entre el 23 de diciembre de 2009 y el 6 de enero de 2010. Entre el 23 y 31 de diciembre, el tiburón 1 se retiró de Isla San José con dirección al noreste aproximándose a la Cuenca Pescadero. El 1 de enero cambió la dirección de sus movimientos hacia el suroeste y arribó el 6 de enero a Cabo Pulmo. Los movimientos que realizó están rodeando aparentemente la estructura

de alta concentración de clorofila-a que se observó los días 16 a 27 de diciembre de 2009 (Figura 9).

Entre los días 7 al 10 de enero el tiburón 1 permaneció cerca de la costa de Cabo Pulmo a una distancia promedio de 1.9 ± 0.5 km. El 11 de enero se alejó de la costa de Cabo Pulmo y abandonó el Golfo de California. Los últimos 42 días de seguimiento, entre el 12 de enero y el 23 de febrero, el tiburón se encontró en un ambiente oceánico. Del 12 al 30 de enero se dirigió hacia el suroeste. Entre el 31 de enero y 23 de febrero el tiburón 1 cambió su dirección de movimiento hacia el noreste donde concluyeron los 129 días de seguimiento de sus movimientos horizontales. En este periodo de tiempo no se observaron estructuras de altas concentraciones de clorofila-a (Figura 9). Con base en la descripción de los movimientos horizontales del tiburón 1 será referido como el **“Tiburón del Golfo de California”**.

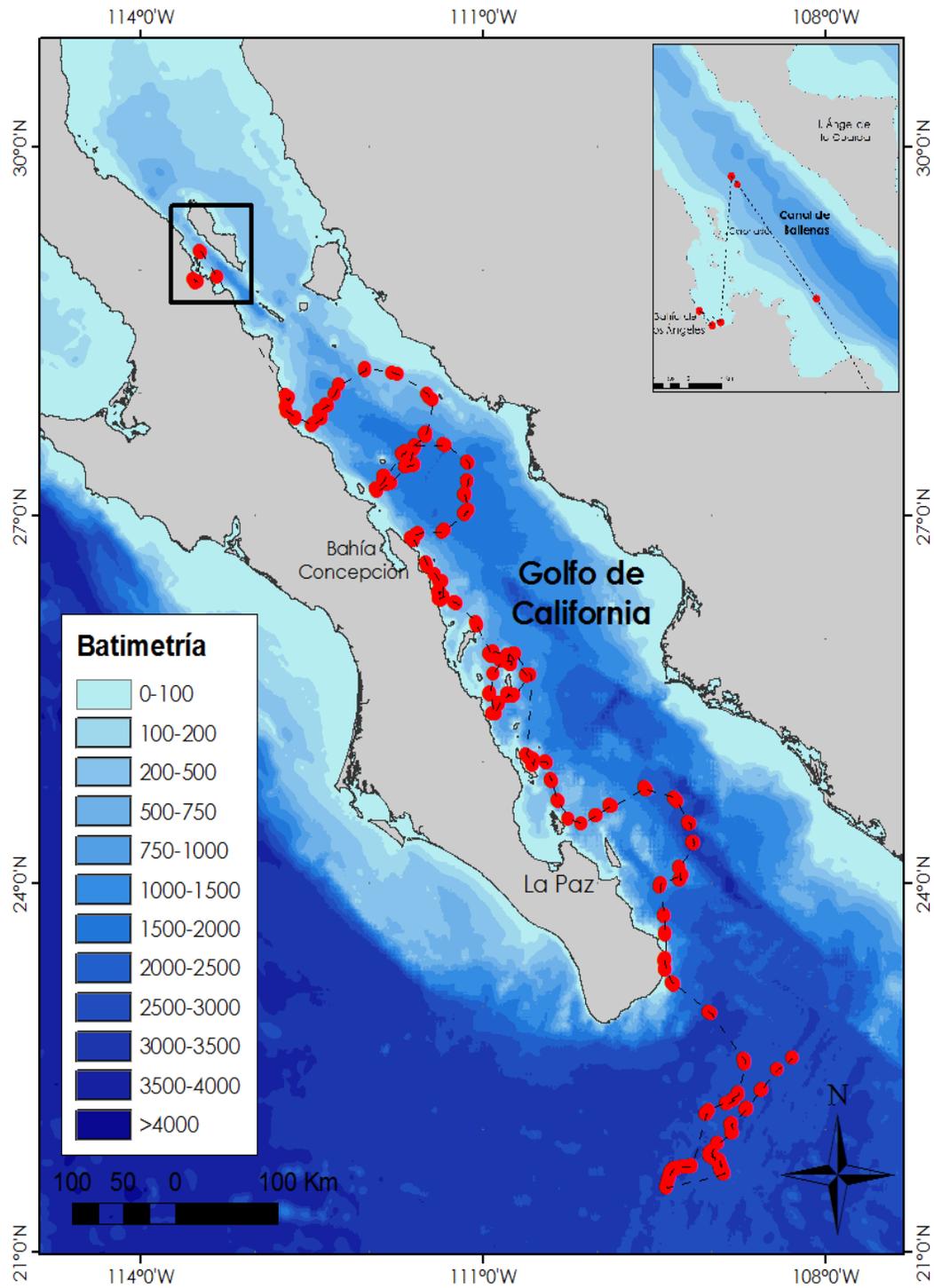


Figura 8. Recorrido del tiburón 1 con 384 registros de las posiciones geográficas (círculos rojos) en un periodo de 129 días, sobre la batimetría (m) del área.

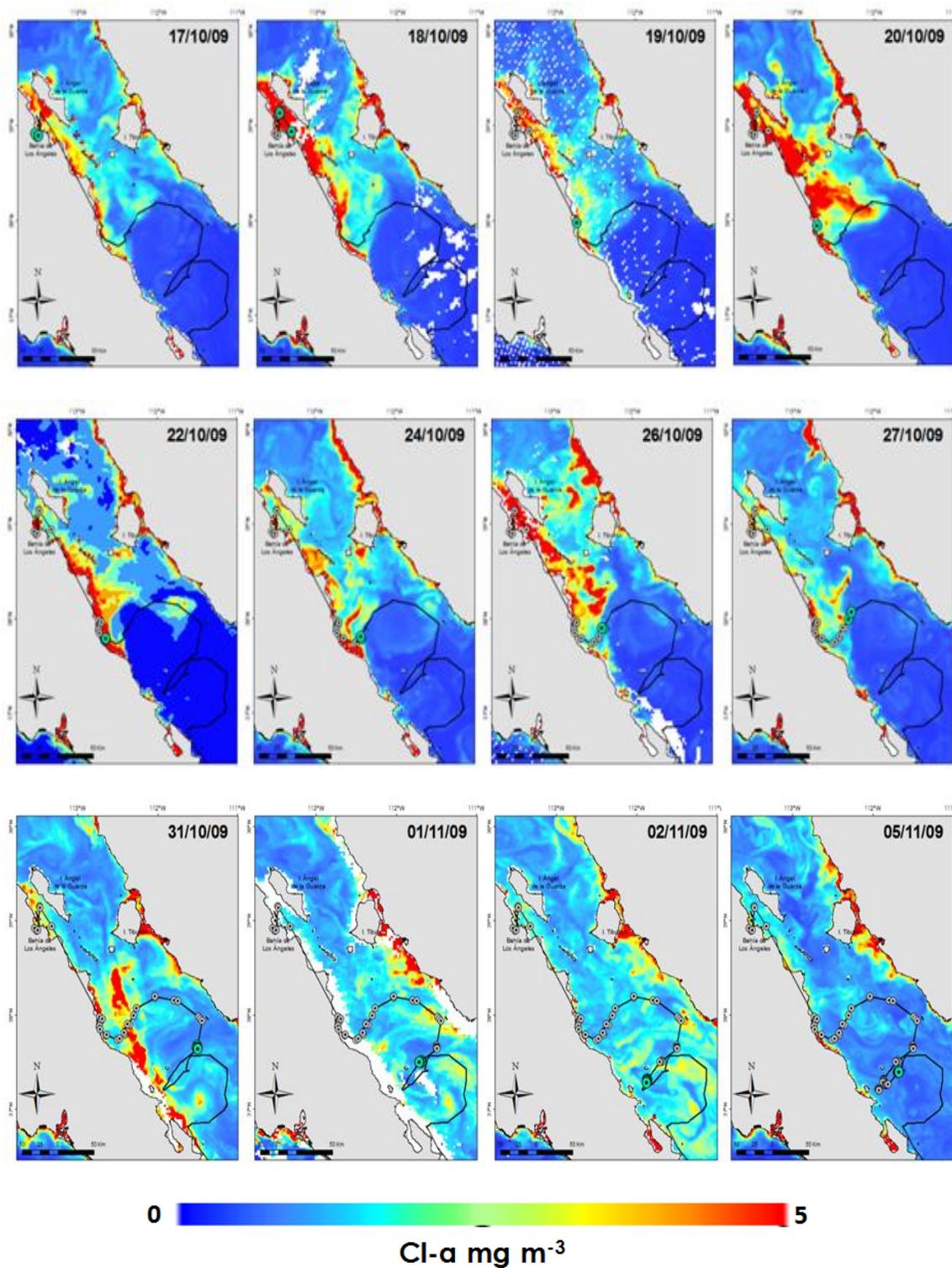


Figura 9. Recorrido del tiburón 1 sobre imágenes diarias de la concentración de clorofila-*a* (mg m⁻³) del 17 de octubre de 2009 a 17 de enero de 2010.

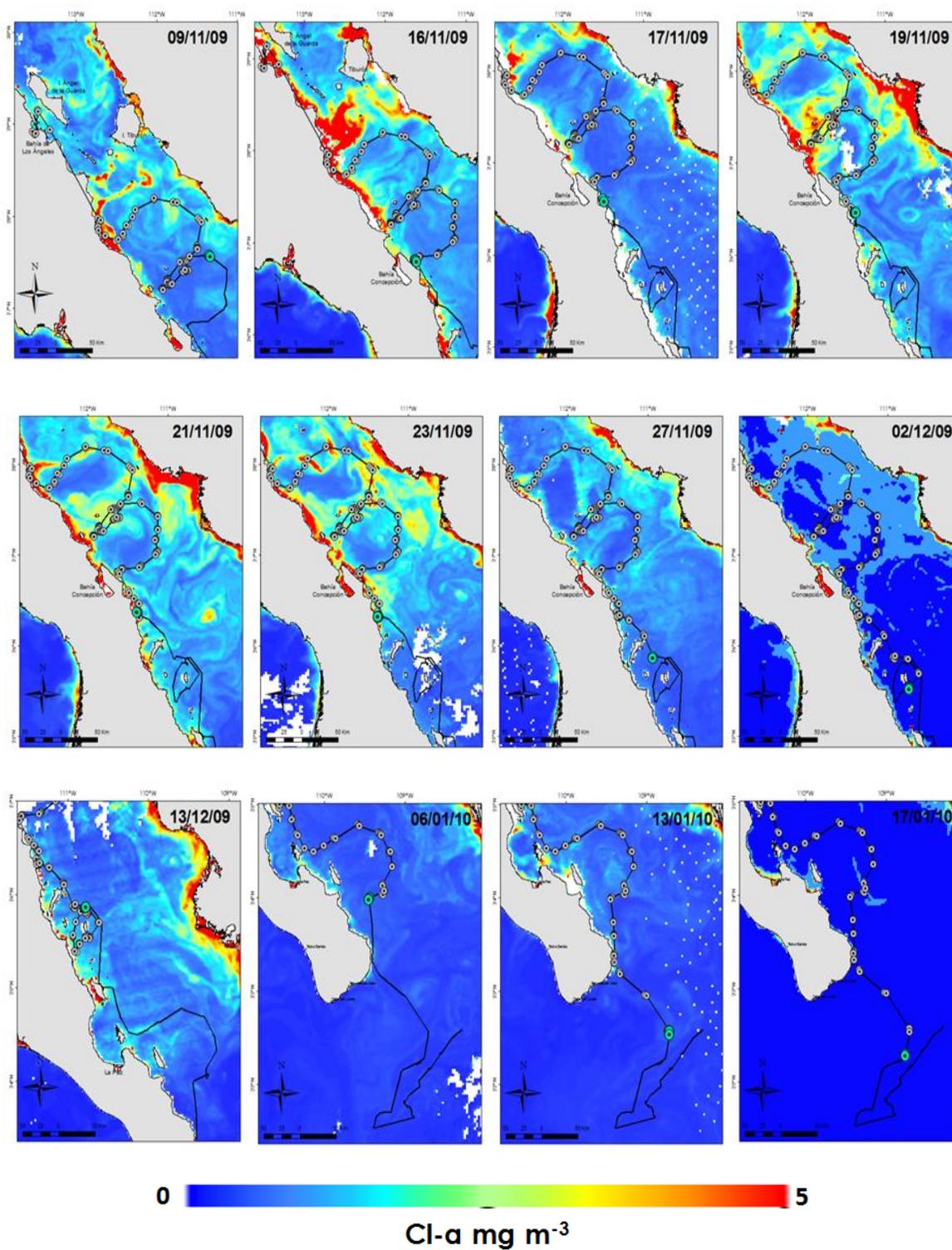


Figura 9 (Continuación). Recorrido del tiburón 1 sobre imágenes diarias de la concentración de clorofila-*a* (mg m^{-3}) del 17 de octubre de 2009 a 17 de enero de 2010.

Tiburón 2

Para el tiburón 2 (SPOT: 98783) se obtuvieron 369 registros de la posición geográfica, de los cuales 345 correspondieron a calidades de mensaje de nivel 1, 2 y 3 durante un periodo de seguimiento de 129 días (17 de octubre de 2009 al 23 de febrero de 2010). Sin embargo, el recorrido efectivo del tiburón 2 comprendió solo 63 posiciones geográficas durante un periodo de seguimiento de 37 días del 17 de octubre a 23 de noviembre de 2009. Los 282 registros de los 92 días restantes del 24 de noviembre de 2009 a 23 de febrero de 2010 correspondieron a posiciones geográficas de la deriva de la marca SPOT en el Pacífico Nororiental debido a un desprendimiento prematuro de la marca (Figura 10).

El tiburón 2 recorrió un total de 2,388.11 km en un periodo de 37 días. La velocidad media fue de $3.1 \pm 1.8 \text{ km h}^{-1}$, con una mínima y una máxima de 0.07, 9.7 respectivamente. La trayectoria del tiburón 2 demostró que una vez que salió de Bahía de los Ángeles ($28^{\circ}54'25''\text{N}$ y $113^{\circ}29'45''\text{W}$) se dirigió hacia el sur del Pacífico Nororiental y terminó el seguimiento de su recorrido entre los $10^{\circ}14'38''\text{N}$ y $108^{\circ}09'56''\text{W}$.

El tiburón 2 permaneció dentro del Golfo de California por 17 días (17 de octubre al 3 de noviembre). Durante los 20 días siguientes entre el 4 y 23 de noviembre, se adentró a aguas oceánicas. En general se observó que realizó el recorrido en regiones donde la batimetría alcanzó profundidades $>3500 \text{ m}$ (Figura 11).

De acuerdo con las imágenes satelitales diarias sobre la concentración superficial de clorofila-*a*, se observó que entre el 17 y 20 de octubre el tiburón 2 permaneció en una región donde se presentó una estructura de alta concentración de clorofila-*a* ($\geq 5 \text{ mg m}^{-3}$) la cual correspondió al área Bahía de Los Ángeles y el Canal de Ballenas. Sin embargo entre el 21 de octubre y el 23 de noviembre esto no ocurrió, por el contrario el tiburón 2 se encontró lejano a la costa en una región oceánica

poco productiva (Figura 11). Con base en la descripción sobre los movimientos horizontales del tiburón 2, será referido como **“Tiburón del Pacífico”**.

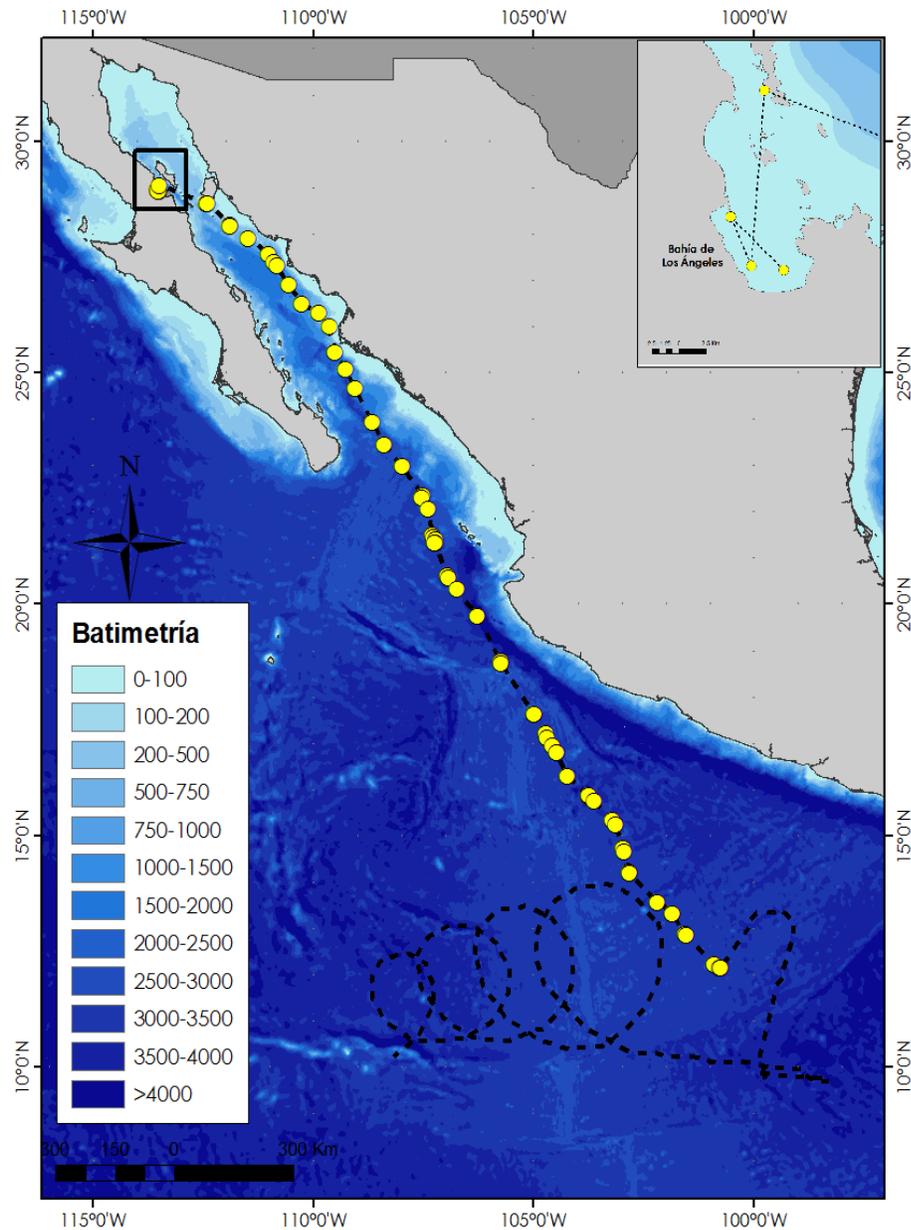


Figura 10. Recorrido total del tiburón 2. La línea negra punteada muestra los 129 días de seguimiento. El recorrido efectivo está representado con 63 posiciones geográficas (círculos amarillos) correspondientes a un periodo de 37 días, sobre la batimetría del área.

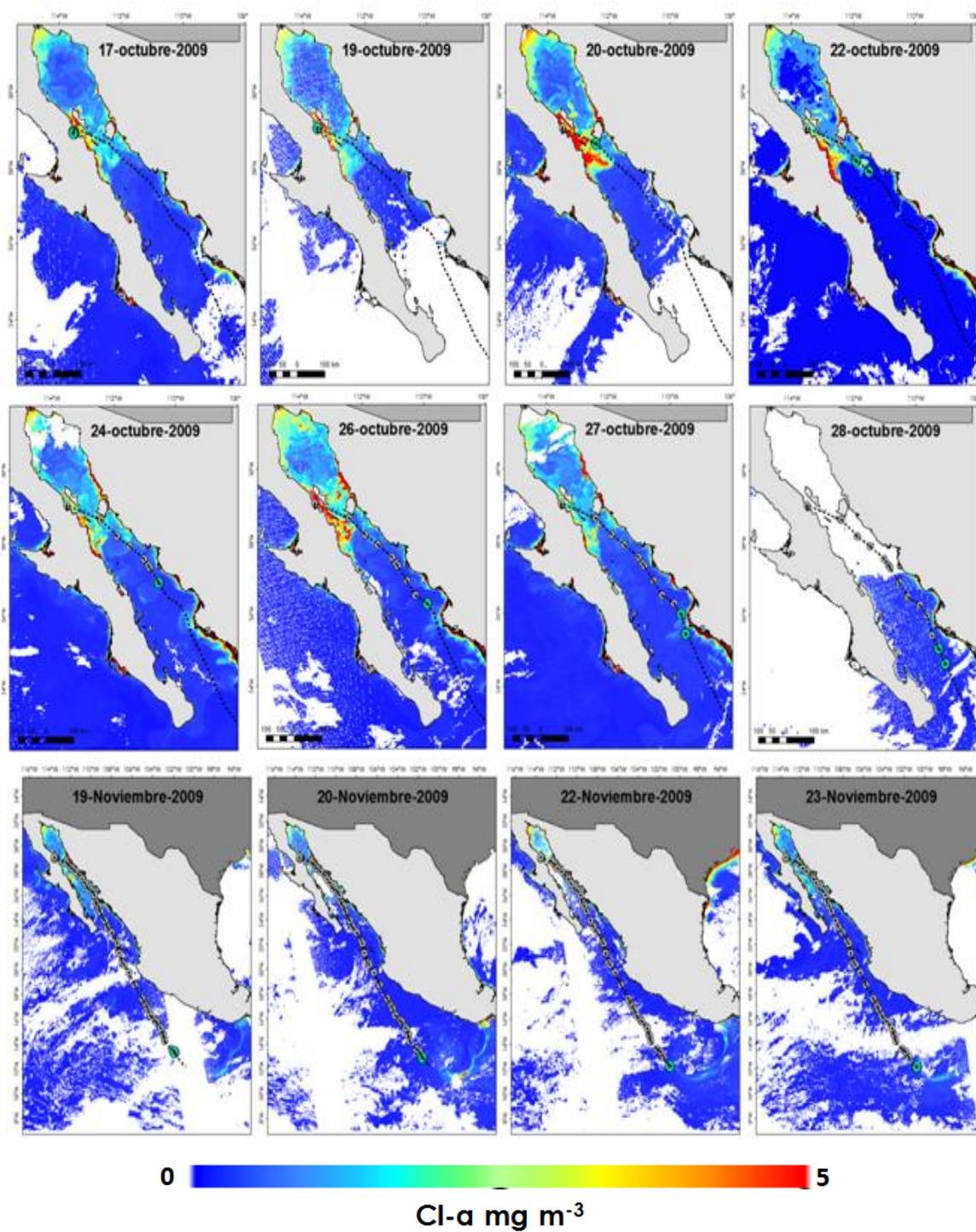


Figura 11. Recorrido del tiburón 2 sobre imágenes diarias de la concentración de clorofila-*a* (mg m^{-3}) del 17 de octubre al 23 de noviembre de 2009.

V.2 Relación entre el movimiento horizontal y variables oceanográficas

Tiburón del Golfo de California

Se obtuvieron los valores de la concentración de clorofila-*a* ($n=116$) que correspondieron a cada fecha y posición geográfica del recorrido del Tiburón del Golfo de California. Cabe mencionar que no se obtuvo la información de toda la serie de tiempo para cada posición geográfica del tiburón ($n=384$) debido a que: 1) la imagen satelital no contuvo información sobre la concentración de clorofila-*a* para la fecha y posición geográfica donde se encontró el Tiburón del Golfo de California y 2) solo se consideraron los valores de clorofila-*a* que correspondieron a posiciones geográfica en horas luz.

El promedio global estimado de clorofila-*a* fue de $1.18 \pm 1.7 \text{ mg m}^{-3}$, con valores mínimo y máximo de 0.15 y 15 respectivamente, considerando cada sitio donde se obtuvo registro sobre la posición geográfica del tiburón. El promedio de la velocidad de desplazamiento fue de $1.23 \pm 1.04 \text{ km h}^{-1}$, las velocidades mínimas y máximas fueron de 0.07 y 6.71 respectivamente (Figura 12).

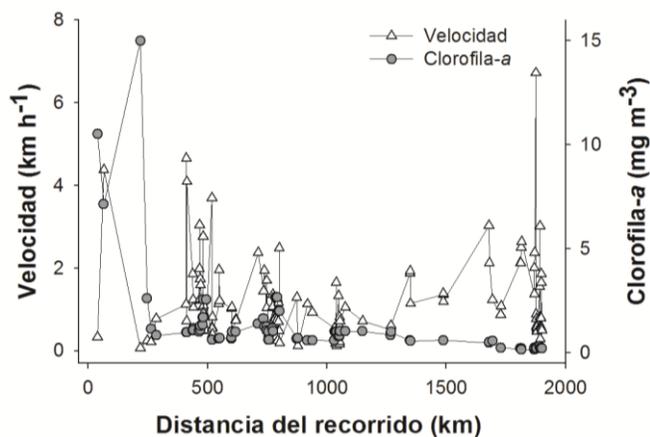


Figura 12. Velocidad de movimiento km h^{-1} (triángulos blancos) del Tiburón del Golfo de California y la concentración de clorofila-*a* mg m^{-3} (círculos grises) durante su recorrido (km).

De acuerdo con el análisis de regresión lineal simple, no se obtuvo una relación significativa ($R^2=0.01$; $p>0.05$) entre el Ln de la concentración superficial de clorofila-a y la velocidad de movimiento del Tiburón del Golfo de California. Por lo tanto los movimientos horizontales de este tiburón, no parecen estar relacionados con la concentración superficial de clorofila-a (Figura 13).

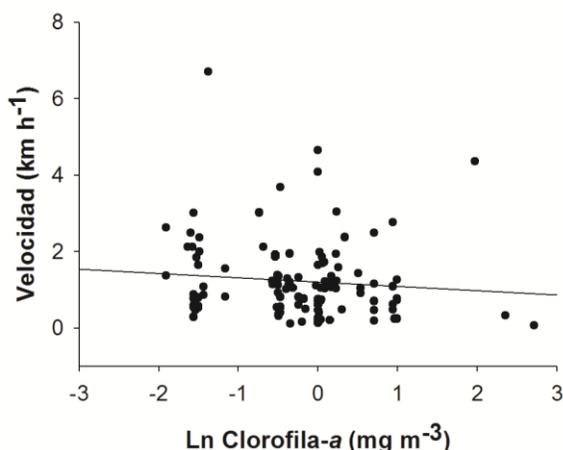


Figura 13. Relación entre el Ln Clorofila-a (mg m^{-3}) y la Velocidad de movimiento (km h^{-1}) del Tiburón del Golfo de California.

Se obtuvieron los valores de la TSM ($n=173$) correspondientes a cada fecha y posición geográfica del recorrido del Tiburón del Golfo de California. El tiburón experimentó una TSM promedio de 24.1 ± 1.4 °C, las temperaturas mínima y máxima observadas fueron de 19.3 y 28 respectivamente. El tiburón experimentó la TSM mínima frente a la costa norte de Bahía Concepción el 3 de noviembre. La TSM máxima la experimentó el 18 de noviembre cuando se encontró frente a la costa sur de Bahía Concepción. La velocidad de movimiento horizontal mínima, máxima y promedio en cada posición geográfica fue de 0.05, 6.7 y 1.3 ± 1.2 km h^{-1} , respectivamente (Figura 14).

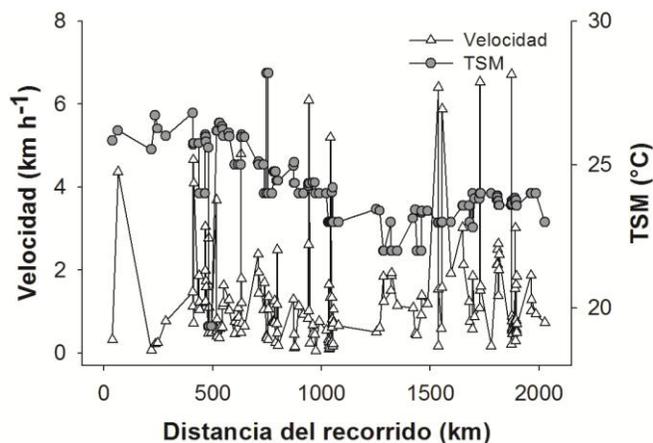


Figura 14. Velocidad de movimiento km h^{-1} (triángulos blancos) del Tiburón del Golfo de California y la TSM $^{\circ}\text{C}$ (círculos grises) durante su recorrido (km).

De acuerdo con el análisis de regresión lineal simple, no se obtuvo una relación significativa ($R^2=0.001$; $p>0.05$) entre la temperatura superficial del mar y la velocidad de movimiento del Tiburón del Golfo de California. Esto indicó que los movimientos horizontales de este tiburón no están relacionados a la TSM (Figura 15).

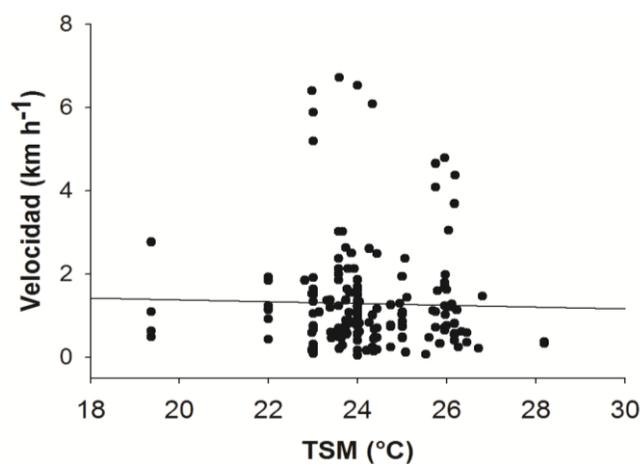


Figura 15. Relación lineal entre la TSM $^{\circ}\text{C}$ y la velocidad de movimiento horizontal km h^{-1} del Tiburón del Golfo de California.

Tiburón del Pacífico

Se obtuvieron los valores efectivos de la concentración de clorofila-*a* ($n=21$) correspondientes a cada fecha y posición geográfica del recorrido del Tiburón del Pacífico. El promedio global estimado de clorofila-*a* fue de $0.20 \pm 0.13 \text{ mg m}^{-3}$, con valores mínimo y máximo de 0 y 0.48 respectivamente, considerando cada sitio donde se obtuvo registro sobre la posición geográfica del tiburón. Las velocidades a las que se desplazó el tiburón mínima, máxima y promedio en cada posición geográfica donde se obtuvo un valor de clorofila-*a* fueron de 1.4, 7.5, $3.4 \pm 1.4 \text{ km h}^{-1}$ respectivamente (Figura 16).

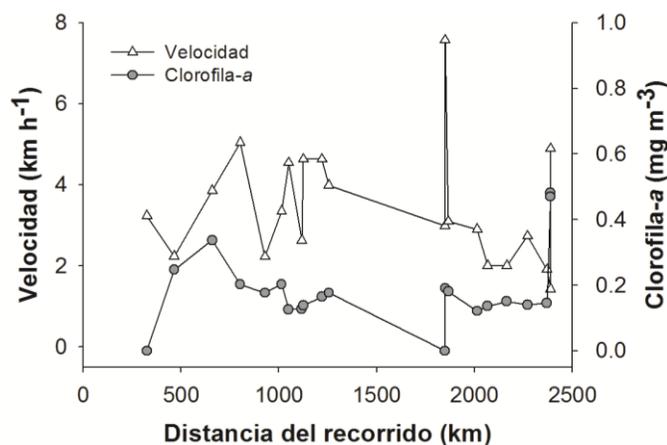


Figura 16. Velocidad de movimiento km h^{-1} (triángulos blancos) del Tiburón del Pacífico y la concentración de clorofila-*a* mg m^{-3} (círculos grises) durante su trayectoria (km).

De acuerdo con el análisis de regresión lineal simple, no se obtuvo una relación significativa ($R^2=0.001$; $p>0.05$) entre el Ln de la concentración de clorofila-*a* y la velocidad de movimiento horizontal del Tiburón del Pacífico. Esto indica que los movimientos de este tiburón no parecen estar relacionados con la clorofila-*a* (Figura 17).

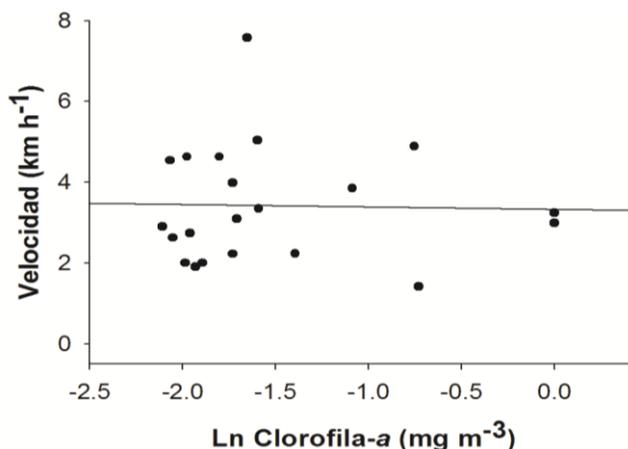


Figura 17. Relación entre el Ln de la concentración de Clorofila-*a* (mg m^{-3}) y la velocidad de movimiento (km h^{-1}) del Tiburón del Pacífico.

Se obtuvieron los valores efectivos de la TSM ($n=22$) que correspondieron a cada fecha y posición geográfica del recorrido del Tiburón del Pacífico. El promedio global estimado de la TSM fue de 28.9 ± 1.3 °C, con valores mínimo y máximo de 25.7 y 31 respectivamente. A medida que el tiburón se dirigió hacia el sur, experimentó una TSM más cálida. La velocidad promedio de desplazamiento estimada fue de 3.1 ± 1.5 km h^{-1} , las velocidades mínima y máxima fueron de 0.07, 7.57 respectivamente (Figura 18).

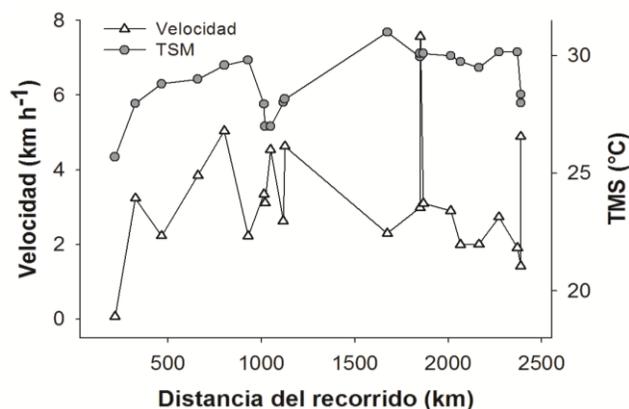


Figura 18. Velocidad de movimiento km h^{-1} (triángulos blancos) del Tiburón del Pacífico y la TSM °C (círculos grises) durante su trayectoria (km).

De acuerdo con el análisis de regresión lineal simple, no se obtuvo una relación significativa ($R^2=0.017$; $p>0.05$) entre la Temperatura Superficial del Mar y la velocidad de movimiento horizontal del Tiburón del Pacífico. Por lo que los movimientos de este tiburón no parecen presentar una relación con la TSM (Figura 19).

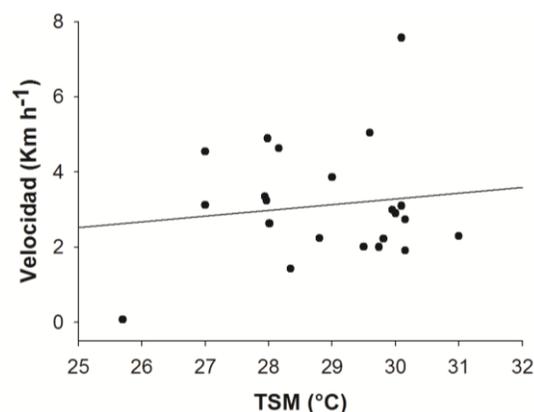


Figura 19. Relación lineal entre la Temperatura Superficial del Mar (°C) y la velocidad de movimiento horizontal del Tiburón del Pacífico.

V.3 Descripción de los movimientos verticales

Tiburón del Golfo de California

Se obtuvo el resumen de la información de cada 3 horas de la marca PAT 88759 correspondiente al Tiburón del Golfo de California sobre el porcentaje del tiempo transcurrido en los diferentes intervalos de profundidad y temperatura. El periodo de seguimiento fue de 92 días, del 17 de octubre de 2009 al 17 de enero de 2010, fecha en la cual la marca se liberó del tiburón tal como estuvo programada. Las transmisiones de los resúmenes se iniciaron el 24 de enero de 2010 al noreste de Bahía de La Paz (Figura 20).

Debido a la diferencia de distancias entre la posición geográfica obtenida de la marca SPOT (17 de enero) y el sitio donde se inició la transmisión de la marca PAT (24 de enero) se planteó el siguiente escenario. Con base en los movimientos que el tiburón realizó con dirección al noreste en el golfo y retornó a la costa occidental entre el 24 de octubre al 2 de noviembre y entre 3 al 16 de noviembre, es posible que entre el 23 de diciembre al 6 de enero las posiciones de la SPOT corresponden a un patrón de movimientos del tiburón. El tiburón realizó movimientos con dirección a Bahía de La Paz y permaneció ahí hasta que la marca PAT se liberó. Mientras que la SPOT se desprendió y derivó a partir del 7 de enero de 2010 (Figura 20).

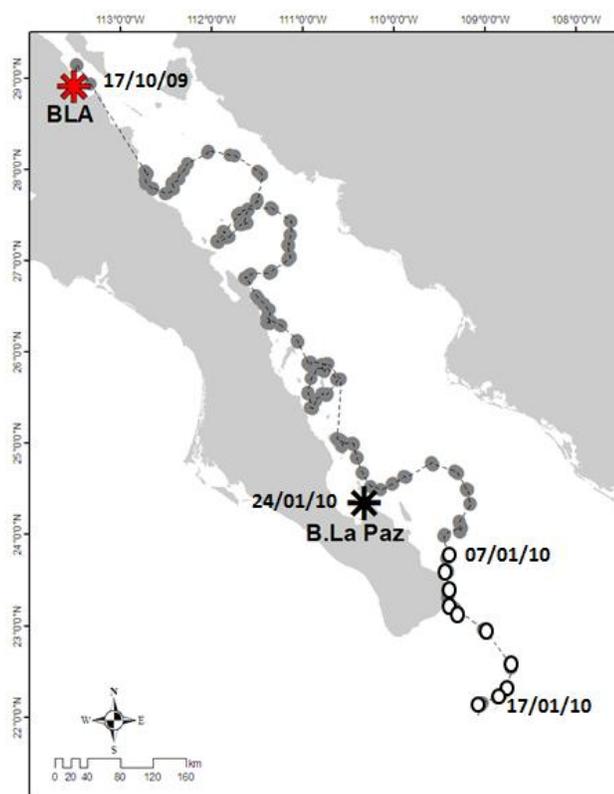


Figura 20. Se presenta el recorrido del Tiburón del Golfo de California del 17 de octubre de 2009 al 6 de enero de 2010 (círculos grises). La marca PAT inició el registro de los movimientos verticales en Bahía de Los Ángeles (asterisco en rojo) y se liberó e inició la transmisión de información al noreste de Bahía de La Paz (asterisco en negro). Se presentan las posibles posiciones geográficas de la posible deriva de la marca SPOT del 7 al 17 de enero (círculos blancos).

En general el Tiburón del Golfo de California mostró una mayor preferencia por las aguas poco profundas ya que las frecuencias más altas 45.4, 29.1 y 14.9 % correspondieron a los intervalos de profundidad de 0-2, 2-10 y 10-20 m respectivamente. La profundidad máxima registrada fue de 734.5 m, cabe mencionar que esta inmersión profunda la realizó mientras se encontraba en el Canal de Ballenas (Figura 21).

El tiburón permaneció la mayor parte de su tiempo en aguas cálidas ya que la mayor frecuencia observada fue de 57.3 % para el intervalo de 24-27 °C y un 28 % correspondió al de 27-30 °C. También se observó que un bajo porcentaje de su tiempo experimentó temperaturas de 15-18 °C. La temperatura mínima y máxima registrada fueron 7.9 y 27.85 °C (Figura 21).

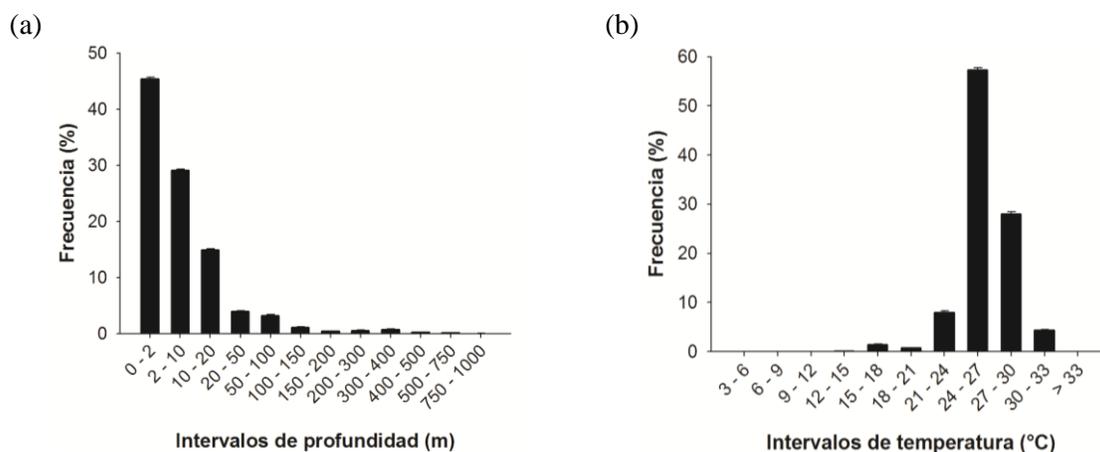


Figura 21. Histogramas de (a) tiempo-profundidad y (b) tiempo-temperatura del Tiburón del Golfo de California.

Tiburón del Pacífico

Se obtuvo el resumen de la información de cada 6 horas de la PAT 88774 correspondiente al Tiburón del Pacífico sobre el porcentaje del tiempo transcurrido en los diferentes intervalos de profundidad y temperatura. Al igual que en el tiburón anterior, el periodo de seguimiento fue de 92 días (del 17 de octubre de 2009 y finalizó el 17 de enero de 2010). La marca se liberó del tiburón tal como estaba programada e inició la transmisión de los resúmenes frente a la costa de El Salvador (Figura 22).

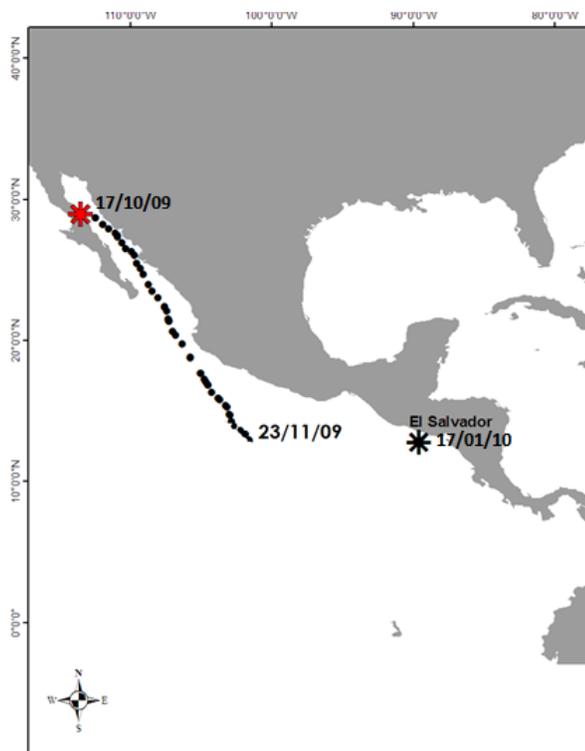


Figura 22. Se presenta el recorrido del Tiburón Pacífico correspondiente a 37 días (en círculos negros). La marca PAT inició el registro de los movimientos verticales en Bahía de Los Ángeles (en rojo) y se liberó e inició la transmisión de información en el Pacífico Tropical cercano a la costa de El Salvador (asterisco en negro).

En general el Tiburón del Pacífico pasó el mayor porcentaje de su tiempo (36.8 %) entre los 0-2 m, así como también se observó que hubo gran actividad en sus movimientos verticales ya que el 17 % de su tiempo transcurrió entre los 50-100 m de profundidad. La profundidad máxima registrada en el resumen del perfil de profundidad fue de 944 m (Figura 23).

En relación a la temperatura, el Tiburón del Pacífico mostró una mayor preferencia por aguas cálidas ya que pasó un 52.1 % de su tiempo en el intervalo de 30-33 °C, seguido de 23.7 % de su tiempo en los 27-30 °C. Además se observó que el tiburón también pasó un 6.9 % de su tiempo en temperaturas de 15-18 °C. Las temperaturas mínima y máxima registradas fueron de 5 y 31 °C (Figura 23).

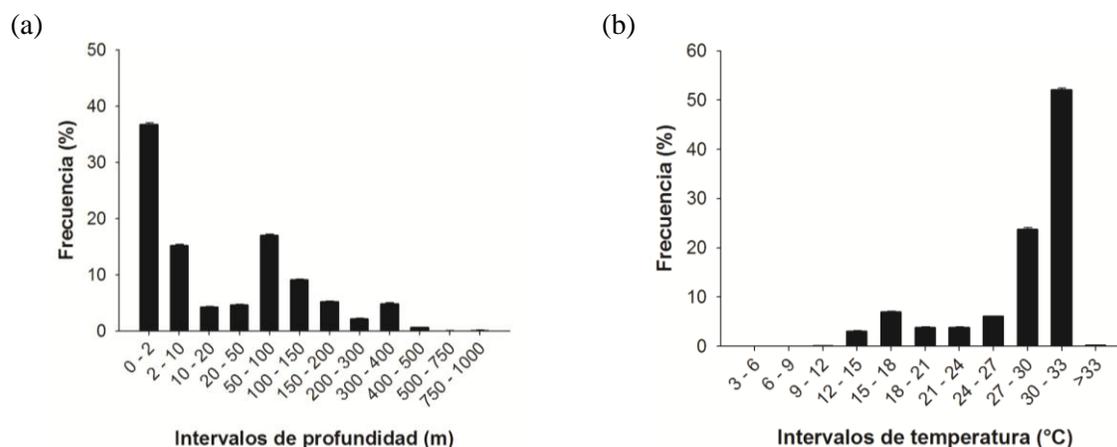


Figura 23. Histogramas de (a) tiempo-profundidad y (b) tiempo-temperatura del Tiburón del Pacífico.

V.4 Descripción y comparación de la actividad en los movimientos verticales de los tiburones

Tiburón del Golfo de California

Se estimó la frecuencia de la proporción de tiempo que pasó el tiburón durante el día y durante la noche en los intervalos de profundidad y temperatura. Se observó que durante el día el tiburón mostró una preferencia por profundidades superficiales, ya que a los 0-2 m pasó un 49.5 % y a los 2-10 m 36.4% de su tiempo. De igual manera se observó que durante la noche el tiburón prefirió profundidades menores, ya que a los 0-2 m pasó un 42 % y a los 2-10 m pasó un 24.5 % de su tiempo (Figura 24).

Durante la noche se observó que en los intervalos de profundidad de 10-20, 20-50 y 50-100 m las frecuencias fueron de 18.5, 5.9 y 5.1 % respectivamente, las cuales fueron mayores que las observadas durante el día (10.6, 1.7 y 0.9 %) en esos intervalos de profundidad. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas (K-S, $D_{\max} = 0.038$, $p > 0.05$) entre las proporciones de tiempo que pasó el Tiburón del Golfo de California en los intervalos de profundidad durante el día en comparación con la noche (Figura 24).

En relación a la temperatura, el tiburón del Golfo de California experimentó principalmente temperaturas de 24-27 °C durante la noche, ya que pasó 60.6 % del tiempo en ese intervalo de temperatura. De igual manera, el mayor porcentaje observado durante el día (53.5 %) fue en el intervalo de 24-27 °C. Sin embargo no se observaron diferencias significativas (K-S, $D_{\max} = 0.027$, $p > 0.05$) entre las proporciones de tiempo que pasó en los intervalos de temperatura durante el día en comparación con la noche (Figura 24).

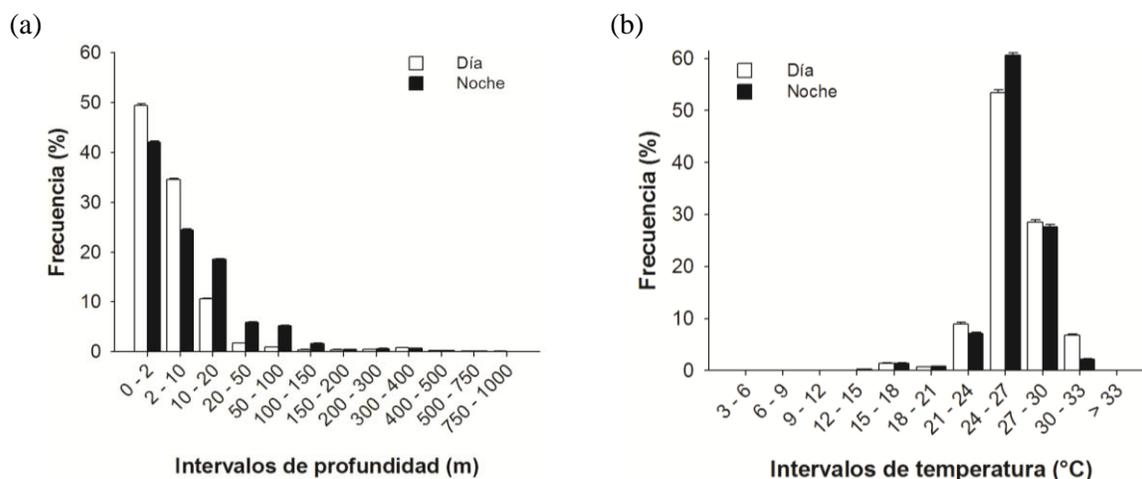


Figura 24. Histogramas de (a) tiempo-profundidad y (b) tiempo-temperatura día/noche del Tiburón del Golfo de California.

Tiburón del Pacífico

Se estimó la frecuencia de la proporción de tiempo que pasó durante el día y durante la noche en los distintos intervalos de profundidad y temperatura. Se observó que durante el día el Tiburón del Pacífico mostró una preferencia por profundidades superficiales, ya que a los 0-2 m pasó un 35.4 % de su tiempo. Así como también se observó durante el día presentó una gran actividad en sus movimientos verticales ya que pasó un 18.8 % de su tiempo en profundidades de 50-100 m (Figura 25).

Por lo que respecta a la noche, el Tiburón del Pacífico permaneció un 38.2 % del tiempo a los 0-2 m y un 16.1 % a los 2-10 m de profundidad. El tiempo que el Tiburón del Pacífico pasó en el estrato más superficial (0-2 m) fue ligeramente mayor durante la noche (38.2 %) que durante el día (35.4 %). Se observó lo inverso para las profundidades de 50-100 m ya que durante el día pasó más tiempo (18.8 %) en comparación con el porcentaje que pasó en la noche (15 %) (Figura 25). Sin embargo, no se observaron diferencias significativas (K-S,

$D_{\max}=0.18$, $p>0.05$) entre las proporciones de tiempo que pasó durante el día en comparación con la noche, en los diferentes intervalos de profundidad.

En relación a la temperatura el tiburón del Pacífico experimentó durante el día principalmente temperaturas entre los 30-33 °C ya que presentó una frecuencia del 53.2 %. En comparación con la noche se observó que principalmente el 25 % de su tiempo experimentó temperaturas entre los 27-30 °C (Figura 25). Sin embargo no se observaron diferencias significativas (K-S, $D_{\max}= 0.02$, $p>0.05$) entre las proporciones de tiempo que pasó el tiburón durante el día y durante la noche en los diferentes intervalos de temperatura.

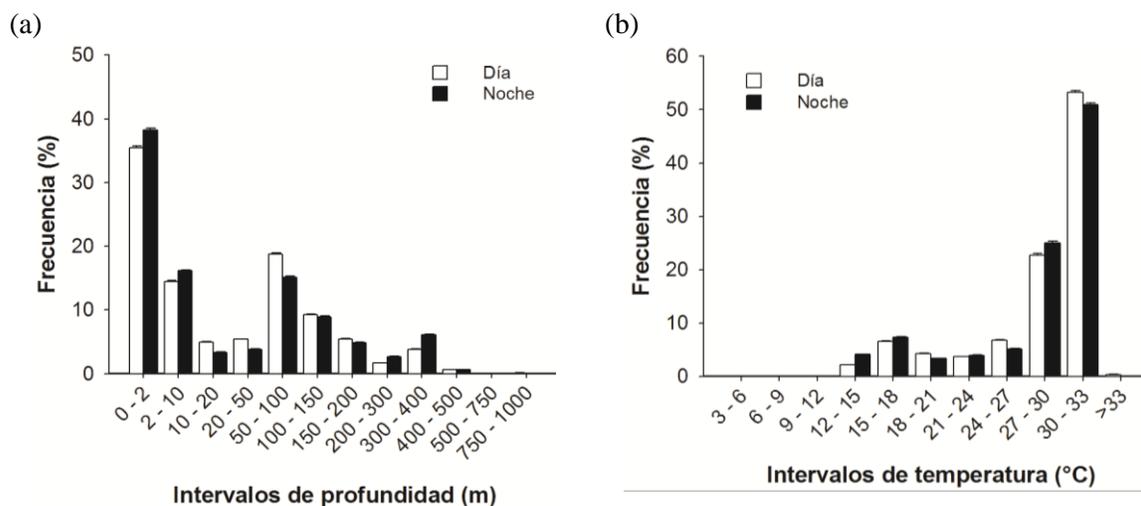


Figura 25. Histogramas de (a) tiempo profundidad y (b) tiempo-temperatura día/noche del Tiburón del Pacífico.

V.5 Descripción y comparación de la actividad en los movimientos verticales entre tiburones en el Golfo de California.

Se estimó y comparó la frecuencia de la proporción de tiempo que pasaron el Tiburón del Golfo de California y el Tiburón del Pacífico en los diferentes intervalos de profundidad y temperatura mientras se encontraron en el Golfo de California. El Tiburón del Golfo de California permaneció 81 días (del 17 de octubre de 2009 al 6 de enero de 2010) y el Tiburón del Pacífico 12 días (del 17 de octubre al 2 de noviembre) (Figura 26).

En general se observó que el Tiburón del Golfo de California pasó el mayor porcentaje de su tiempo en los intervalos de profundidad 0-2, 2-10, 10-20, las frecuencias observadas fueron de 43.8, 28.6 y 15.7 % respectivamente. En contraste se el Tiburón del Pacífico pasó el mayor porcentaje de su tiempo entre los 0-2, 50-100, 100-150, las frecuencias observadas fueron de 17.8, 14.8 y 17.6 (Figura 26).

Las frecuencias de las proporciones de tiempo que pasaron los tiburones en los diferentes intervalos de profundidad son significativamente diferentes (K-S, $D_{\max}=0.52$, $p<0.05$). Esto nos indica que presentaron comportamientos diferentes mientras estuvieron en el Golfo de California. Mientras que el Tiburón del Golfo de California permaneció el mayor porcentaje de su tiempo entre los 0-20 m, el Tiburón del Pacífico mostró una mayor actividad en sus movimientos verticales.

Con respecto a la temperatura se observó en general que el Tiburón del Golfo de California permaneció un mayor porcentaje (55 %) de su tiempo en 24-27 °C. Mientras que el Tiburón del Pacífico experimentó un mayor porcentaje de su tiempo (33.4 %) aguas más cálidas (30-33 °C) (Figura 26). Sin embargo, no se observaron diferencias significativas entre la frecuencia de la proporción de tiempo que pasaron en los diferentes intervalos de temperatura (K-S, $D_{\max}=0.2$, $p>0.05$).

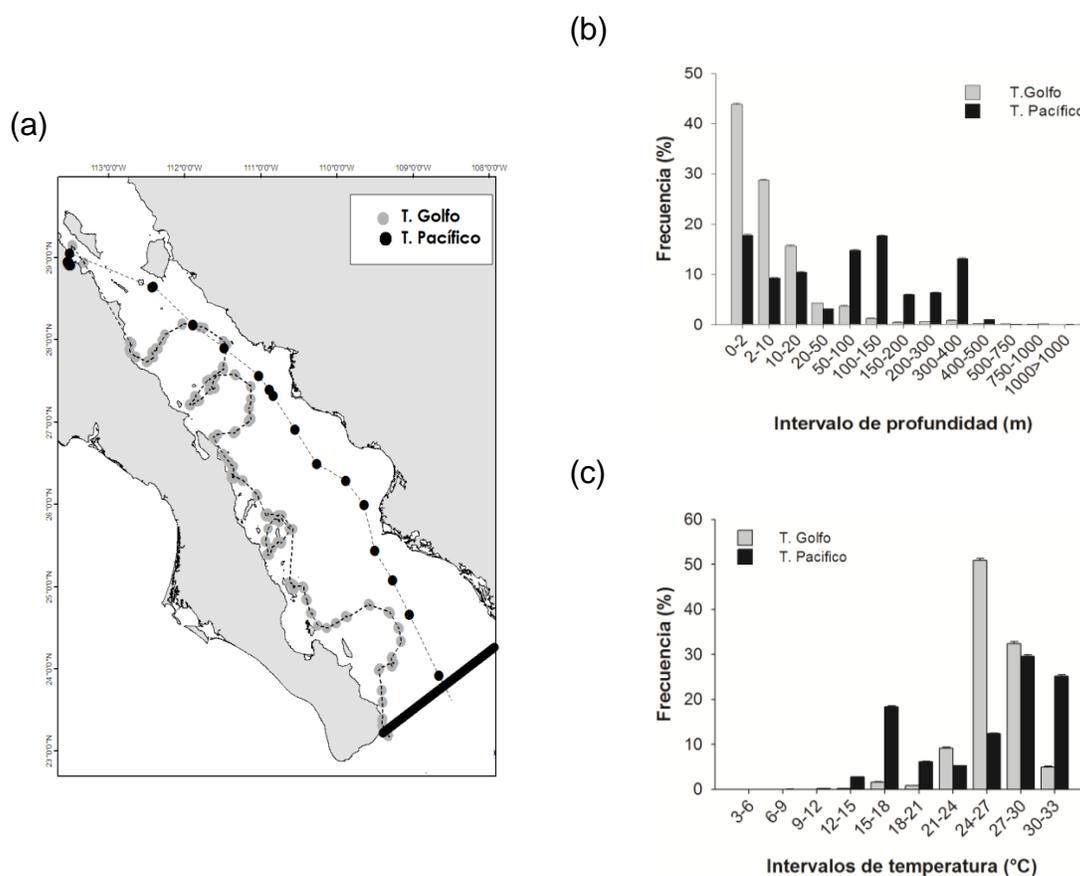


Figura 26. (a) Imagen de los recorridos de ambos tiburones mientras se encontraron dentro del Golfo de California. Histogramas de (b) tiempo-profundidad y (c) tiempo-temperatura del Tiburón del Golfo de California (barra gris) y el Tiburón del Pacífico (barra negra).

En relación a la actividad de movimiento vertical diurna y nocturna del Tiburón del Golfo de California, no se observaron diferencias significativas (K-S, $D_{\max}=0.18$, $p>0.05$) entre las proporciones de tiempo que pasó en los diferentes intervalos de profundidad durante el día en comparación con la noche. Así como tampoco se observaron diferencias significativas (K-S, $D_{\max}=0.01$, $p>0.05$) entre la proporción de tiempo que pasó este tiburón durante el día y durante la noche en los diferentes intervalos de temperatura (Figura 27).

Con respecto a la actividad de movimiento vertical diurna y nocturna del Tiburón del Pacífico, no se observaron diferencias significativas (K-S, $D_{\max}=0.03$, $p>0.05$)

entre las proporciones de tiempo que pasó en los diferentes intervalos de profundidad durante el día en comparación con la noche. Así como tampoco se observaron diferencias significativas (K-S, $D_{\max} = 0.01$, $p > 0.05$) entre la proporción de tiempo que pasó este tiburón durante el día y durante la noche en los diferentes intervalos de temperatura (Figura 28).

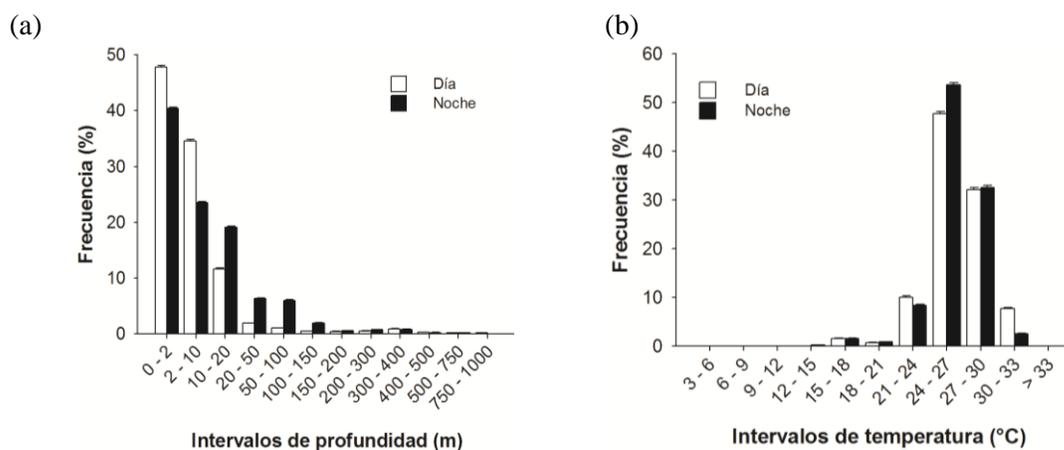


Figura 27. Histogramas de (a) tiempo-profundidad y (b) tiempo temperatura día/noche del Tiburón del Golfo de California, de un periodo de 81 días.

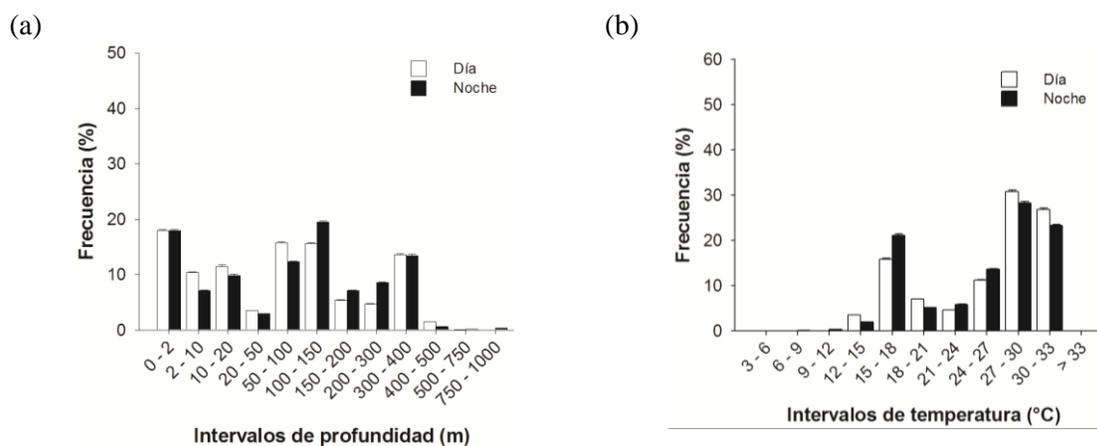


Figura 28. Histogramas de (a) tiempo-profundidad y (b) tiempo temperatura día/noche del Tiburón del Pacífico, de un periodo de 12 días.

V.6 Descripción detallada de los movimientos verticales del Tiburón del Golfo de California

Se obtuvo la información completa de la marca PAT (No. 88759) del Tiburón del Golfo de California, la cual contuvo además de la información sobre la profundidad de inmersión, la temperatura ambiental que experimentó el tiburón, el nivel de luz por intervalos de 10 segundos. El periodo de seguimiento fue de 92 días entre el 17 de octubre de 2009 a 17 de enero de 2010.

En general se observó el Tiburón del Golfo de California realizó movimientos verticales principalmente entre los 0-100 m de profundidad. Sin embargo se observaron tres notables eventos en el incremento de la profundidad en los movimientos verticales. Por lo consiguiente se identificaron seis secciones las cuales están relacionadas al periodo y la región donde realizó el tiburón su recorrido (Figura 29).

A) Primera sección (del 17 al 23 de octubre): cuando se encontró en Bahía de los Ángeles, Canal de Ballenas y el Norte de Santa Rosalía. A excepción de Bahía de Los Ángeles, se observó que en el Canal de Ballenas realizó las inmersiones más profundas de todo el seguimiento. La inmersión máxima registrada fue de 734.5 m de profundidad. Las temperaturas mínima, máxima y promedio observadas fueron de 7.9, 27.8 y 23.4 ± 4.5 °C respectivamente (Figura 29).

B) Segunda sección (del 24 de octubre al 2 de noviembre): el tiburón se alejó de la costa y se dirigió al noreste y realizó movimientos horizontales en la parte central del golfo hasta que se aproximó a la costa oriental y después retornó a la costa occidental. Se observó el segundo evento donde realizó inmersiones profundas. La inmersión máxima registrada fue de 172.5 m de profundidad. Las temperaturas mínima, máxima y promedio que experimentó fueron de 14.6, 27.8 y 26 ± 1.1 °C respectivamente (Figura 29).

C) Tercera sección (del 3 al 16 de noviembre): el tiburón se dirigió por segunda ocasión al noreste y realizó movimientos horizontales en el centro del golfo hasta aproximarse a la costa oriental. Se observó que los movimientos verticales los realizó principalmente entre los 0-100 m de profundidad, la inmersión máxima registrada fue de 85 m. Las temperaturas mínima, máxima y promedio que experimentó fueron 20.8, 26.5 y 25.3 ± 0.5 °C respectivamente (Figura 29).

D) Cuarta sección (del 17 de noviembre al 22 de diciembre): el tiburón se dirigió hacia el sur sobre la costa occidental del Golfo de California, hasta Isla Espíritu Santo. Se observó que los movimientos verticales los realizó principalmente entre los 0-100 m de profundidad. La inmersión más profunda fue de 103 m. Las temperaturas mínima, máxima y promedio que experimentó fueron 18.1, 24.5 y 22.4 ± 1 °C respectivamente (Figura 29).

E) Quinta sección (del 23 de diciembre al 6 de enero de 2010): el tiburón se dirigió por tercera ocasión hacia el noreste hasta que se aproximó a la Cuenca Pescadero y después retornó a la costa occidental del golfo. En este periodo se observó el tercer evento en el incremento de la profundidad de la inmersión. La inmersión más profunda fue de 372 m. Las temperaturas mínima, máxima y promedio que experimentó fueron de 10.6, 23.2 y 20.8 ± 1.5 °C respectivamente (Figura 29).

F) Sexta sección (del 7 al 17 de enero): No se tiene certeza si los movimientos verticales corresponden a las posiciones geográficas registradas por la marca SPOT. Sin embargo, se observó que la máxima inmersión fue de 22.5 m y las temperaturas mínima, máxima y promedio que experimentó fueron 20.7, 23.2 y 22 ± 0.4 °C respectivamente (Figura 29).

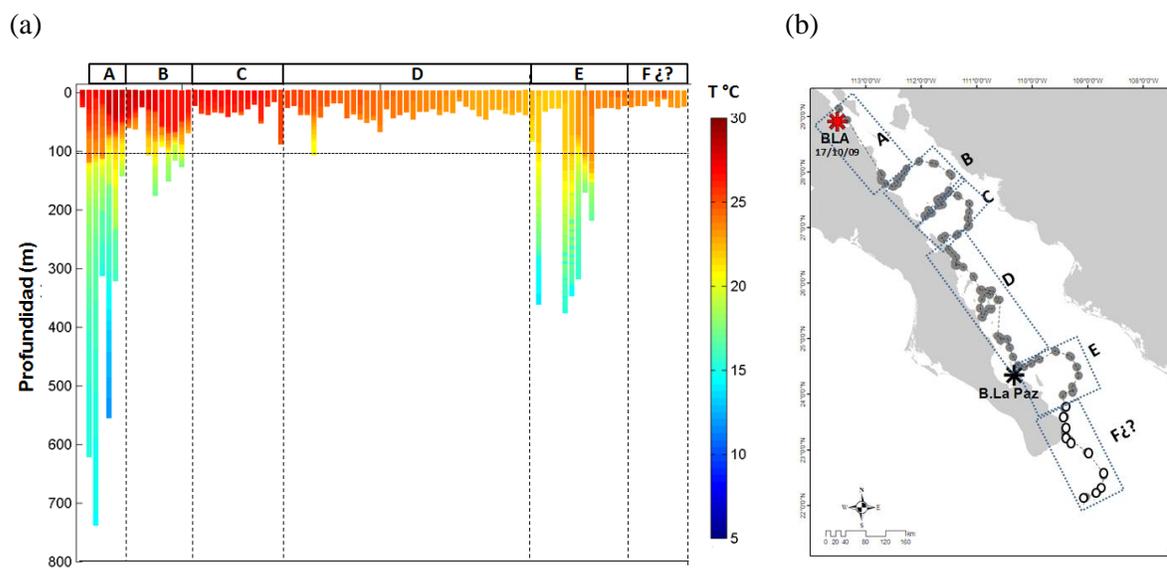


Figura 29. Se presenta (a) el perfil de profundidad (m) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$) diario y (b) la trayectoria del Tiburón del Golfo de California. Se señala el inicio (asterisco rojo) y la terminación del seguimiento de los movimientos verticales. Las secciones A, B, C, D y E delimitadas en ambas figuras representan un seguimiento de movimientos horizontales y verticales de 81 días (del 17 de octubre de 2009 al 6 de enero de 2010). La sección F (del 7 de enero al 17 de enero) se presenta con signos interrogatorios (?), debido a que no se tiene claro el área donde el tiburón realizó los movimientos verticales correspondientes a este periodo.

Periodicidad de los movimientos verticales del y su relación con el fotoperiodo

Con base a la descripción detallada de los movimientos verticales en las seis secciones se identificaron dos tipos de actividades en los movimientos verticales: 1) Inmersiones profundas en Canal de Ballenas y en la región central del Golfo de California y 2) inmersiones de ≤ 100 m de profundidad cercanas a la costa oriental del Golfo de California. La información sobre la profundidad en intervalos de 10 segundos correspondiente a cada una de las secciones se analizó con la Transformada de Fourier.

En la sección A, correspondiente al Canal de Ballenas donde el tiburón realizó las inmersiones más profundas (Figura 26 A-1) no se observó un componente espectral importante que indicara una periodicidad (Figura 26 A-2). El tiburón realizó las inmersiones más profundas del día a partir de la hora del amanecer y disminuyeron aproximadamente a las 22:00 h. Sin embargo no se observó que los movimientos verticales presentaran una regularidad circadiana (26 A-3). Este patrón de continuos movimientos verticales profundos en el Canal de Ballenas es consistente con la ausencia de componentes espectrales importantes.

En la sección B, mientras el tiburón se dirigió al noreste y centro del golfo realizó grandes desplazamientos verticales (Figura 26 B-1). Se observó un componente espectral de una fuerte periodicidad de 24 h (Figura 26 B-2). El tiburón realizó principalmente durante la noche los desplazamientos verticales más profundos. Los cambios en la profundidad de inmersión los realizó entre las 00:00 – 02:00 h (Figura 26.B-3). Este patrón cíclico de movimientos que realizó el tiburón entre los 0-50 m de profundidad, es consistente con el componente espectral de una periodicidad de 24 h que se observó en el espectro de frecuencia.

En la sección C, correspondiente al movimiento hacia el noreste y centro del golfo, el tiburón realizó movimientos verticales principalmente entre 0-50 m de profundidad (Figura 26 C-1). De acuerdo con el espectro de frecuencia se observaron dos importantes componentes espectrales que corresponden a periodos de 1 y 3 ciclos por día o 24 y 8 h respectivamente (Figura 26 C-2). Por otra parte se observó que el incremento en los movimientos verticales se presentó al atardecer (Figura 26 C-3). El cambio evidente de profundidad que realizó el tiburón al inicio del atardecer es consistente con el componente espectral que presentó un periodo de 24 h. Sin embargo, no se observó una relación entre los movimientos verticales y las horas luz/oscuridad que correspondan a la periodicidad de 8 h.

En la sección D, el tiburón realizó movimientos verticales principalmente entre los 0-50 m de profundidad en la costa oriental del golfo (Figura 26 D-1). El análisis espectral indicó la presencia de un componente espectral de una periodicidad de 24 h (Figura 26 D-2) Por otra parte se observó que los desplazamientos verticales incrementaron durante la hora del amanecer y disminuyó paulatinamente hasta la hora del atardecer (Figura 26 D-3). Este patrón cíclico de movimientos diarios que realizó el tiburón cercano a la costa, fue consistente con el componente espectral de 24 h.

En la sección E, el tiburón realizó por tercera ocasión movimientos hacia el noreste y centro del golfo así como grandes desplazamientos verticales (Figura 26 E-1). De acuerdo con el análisis espectral se observaron tres componentes espectrales de periodos de 1, 3 y 11 ciclos por día (24, 8 y 2.18 h) (Figura 26 E-2). Se observó que a partir del atardecer el tiburón incrementó la profundidad en sus movimientos verticales y conforme se aproximó la hora del amanecer la profundidad de las inmersiones era mayor. Una vez que pasó la hora del amanecer, disminuyó considerablemente la profundidad en sus movimientos verticales y permaneció en promedio entre los 0-50 m (Figura 26.E-3). El cambio abrupto de la profundidad que realizó durante el amanecer fue consistente con el componente espectral con periodicidad de 24 h. Sin embargo no se observó claramente un patrón de movimientos verticales del tiburón relacionados al fotoperiodo, que correspondieran a los componentes espectrales de 8 y 2.18 h.

En la sección F, no se tiene certeza sobre la información de las posiciones geográficas donde realizó movimientos verticales principalmente entre los 0-50 m de profundidad (Figura 26 F-1). De acuerdo con el análisis espectral no se observó la presencia de un componente espectral que presentara una frecuencia fuerte (Figura. 26 F-2). Además no observó que los movimientos verticales presentaran una relación al fotoperiodo (Figura 26 F-3). Este comportamiento es consistente

con la ausencia de componentes espectrales que indiquen una periodicidad (Figura 26.3-F).

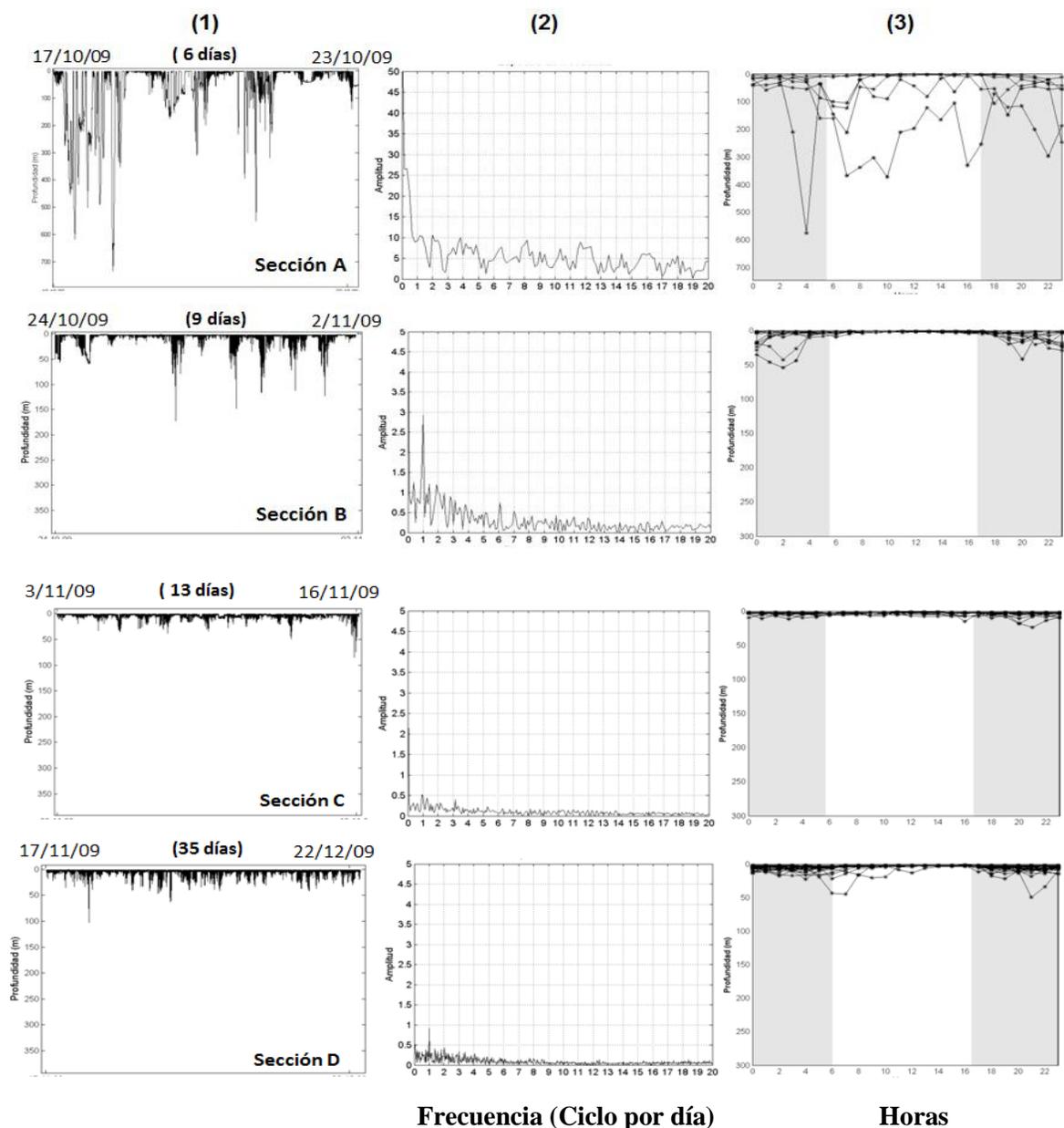


Figura 30. En las **columnas (1)** se presentan los perfiles de inmersión de registros de la profundidad (m) en intervalos de 10 segundos; **(2)** el promedio de la profundidad de inmersión por hora del día. El área blanca representa las horas luz, delimitada a la izquierda por el amanecer y a la derecha por el atardecer. El área gris representa las horas de noche; **(3)** espectro de frecuencia de profundidades en intervalos de 10 segundos. Los **renglones** representan las secciones del recorrido del tiburón.

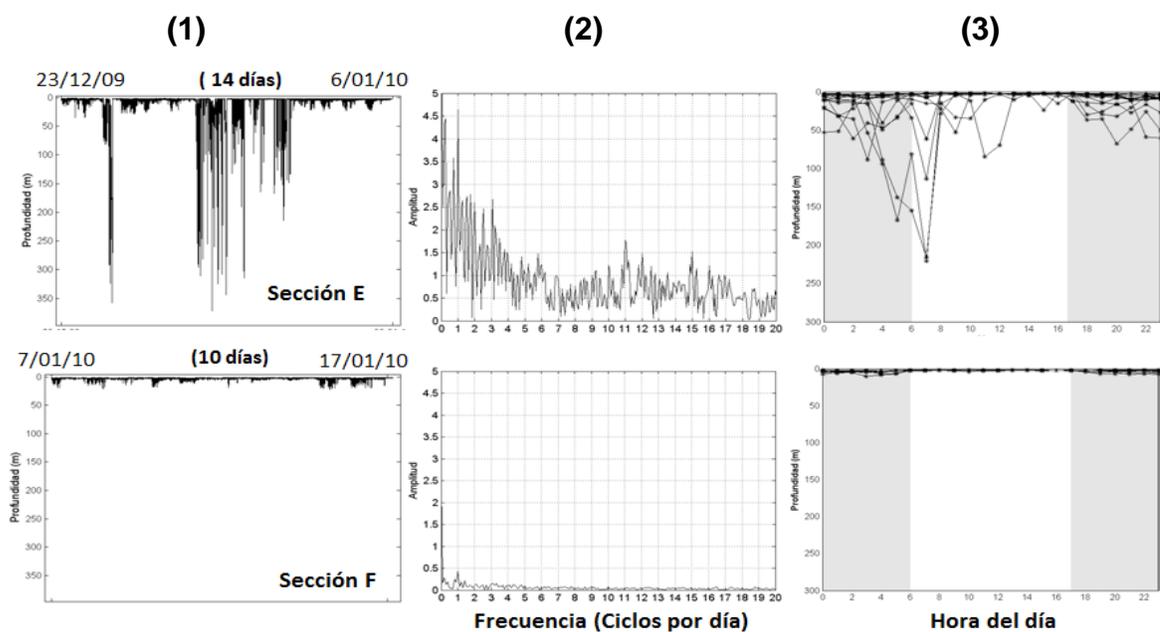


Figura 30 (Continuación). En las **columnas (1)** se presentan los perfiles de inmersión de registros de la profundidad (m) en intervalos de 10 segundos; **(2)** el promedio de la profundidad de inmersión por hora del día. El área blanca representa las horas luz, delimitada a la izquierda por el amanecer y a la derecha por el atardecer. El área gris representa las horas de noche; **(3)** espectro de frecuencia de profundidades en intervalos de 10 segundos. Los **renglones** representan las secciones del recorrido del tiburón.

VI. Discusión

VI.1. Movimientos horizontales y variables oceanográficas

En términos de movimientos horizontales, los dos tiburones ballena bajo estudio presentaron comportamientos distintos. Mientras que el Tiburón del Pacífico abandonó el Golfo de California en un periodo de 12 días y se adentró a una región oceánica por los siguientes 25 días a una velocidad promedio de 3.1 km h^{-1} , el Tiburón del Golfo de California permaneció 81 días dentro del Golfo y los 44 días restantes del seguimiento se dirigió a una región oceánica a una velocidad promedio de 1.2 km h^{-1} . Las velocidades promedio de movimiento observadas en los tiburones bajo estudio, son consistentes con las velocidades promedio mínima y máxima registradas en estudios que se han realizado en el Golfo de California Mar de Sulu, Arrecife Ningaloo, Australia, en el Pacífico Noroeste, Seychelles y Sudáfrica (Tabla I).

En el caso del tiburón del Pacífico, no se observó una relación significativa entre las concentraciones de clorofila-a con la velocidad de movimiento. Por el contrario este tiburón se mantuvo alejado de la costa y el 55 % de su tiempo lo pasó en una región oceánica. Tampoco se observó que presentara una relación significativa entre la temperatura superficial del mar con la velocidad de movimiento. Sin embargo fue evidente que una vez que salió del Golfo de California, los movimientos del tiburón fueron consistentemente hacia el sur. Hsu *et al.* (2007) sugieren que este comportamiento puede estar asociado a que parte del desarrollo de tiburones ballena juveniles se lleve a cabo en regiones oceánicas, en donde los movimientos pueden estar relacionados a un forrajeo activo independientemente de sitios altamente productivos. Por otra parte Eckert y Stewart (2001) sugieren que dentro del Golfo de California se presenta una segregación de tallas y sexo, ya que observaron que los tiburones menores a 4 m de longitud total se distribuyeron en el norte del Golfo de California, mientras que

los que se dispersaron al sur presentaron un tamaño tres veces mayor y en su mayoría eran hembras grávidas. Tales segregaciones pueden prevenir la competencia por alimento entre los tiburones ballena adultos y los juveniles (Martin, 2007). Sin embargo la consistencia en los movimientos horizontales con dirección al sur del Tiburón del Pacífico y del Tiburón del Golfo de California de este estudio, sugiere que este comportamiento también lo podrían presentar los tiburones juveniles.

Montgomery y Walker (2001) mencionan que especies altamente migratorias como el caso del tiburón ballena, pueden estar utilizando pistas geofísicas como el campo magnético de la tierra y la termo-recepción de los gradientes de temperatura en el agua asociados a frentes y remolinos, como una forma de orientación a grandes distancias. Esto podría explicar los movimientos horizontales que realizó el Tiburón del Pacífico, ya que se observó que el seguimiento de su recorrido finalizó en una región donde se presentan remolinos (Willet *et al.*, 2006; Zamudio *et al.*, 2007). Las posiciones emitidas durante la deriva de la marca SPOT sugieren que después de desprenderse del tiburón derivó en un remolino.

En el caso del Tiburón del Golfo de California no se observó una relación lineal significativa entre la concentración de clorofila-*a* y la velocidad de movimiento. Sin embargo, las imágenes diarias demuestran una aparente compatibilidad entre las estructuras de altas concentraciones de clorofila-*a* y el recorrido del Tiburón del Golfo de California, ya que se observó que se dirigió y permaneció en sitios donde fue evidente la alta concentración de clorofila-*a*. Este comportamiento fue consistente con el observado por Hsu *et al.* (2007) en la región del Kuroshio, en el que sugieren que el comportamiento del tiburón ballena está relacionado a la búsqueda y disponibilidad de alimento. Este comportamiento también es similar al descrito en el tiburón peregrino, que busca activamente hábitats biológicamente

productivos asociados a frentes oceánicos sobre la plataforma continental para forrajear (Sims, 2003).

Aún se desconoce cómo los tiburones ballena localizan las concentraciones de sus presas, sin embargo las cápsulas olfativas del tiburón ballena de forma larga y esférica, sugieren que presenta una habilidad para detectar compuestos químicos disueltos y por lo consiguiente es probable que existan señales químicas indicadoras de alimento (Martin, 2007). Sims y Quayle (1998) sugieren que el compuesto químico Sulfuro de dimetilo liberado por el fitoplancton cuando es pastoreado por el zooplancton, puede ser una pista o señal química que atraiga a los tiburones ballena en distancias cortas, como se ha observado en algunas aves marinas y se ha sugerido para el tiburón peregrino.

Cabe mencionar que en el estudio de Hsu *et al.* (2007) los promedios de la concentración de clorofila-a utilizados fueron mensuales y con una escala espacial de un grado latitudinal, la cual puede ser inadecuada ya que la especie es altamente vágil y pueda presentarse una alta variabilidad de clorofila en un cuadrante de un grado latitudinal y en un periodo de tiempo de un mes. En el presente estudio se emplearon valores diarios de clorofila-a y se seleccionaron rigurosamente en la posición geográfica donde se encontró el tiburón (con una precisión de 0.025 grados). Aunque no se obtuvo una relación significativa, las imágenes satelitales dan una perspectiva del cambio en tiempo y espacio de la concentración de clorofila-a y los movimientos del tiburón ballena en una escala más fina.

VI.2. Movimientos verticales

Algunas especies de tiburones presentan una diferencia en los patrones de inmersión durante el día en comparación con la noche. Estos patrones de movimiento están potencialmente relacionados a la búsqueda de presas (Carey y

Scharold, 1990). Los patrones de movimiento del tiburón ballena pueden estar relacionados a las migraciones verticales de zooplancton que usualmente se agrega durante la noche en la superficie y durante el día a mayores profundidades (Folt y Burns, 1999). Este patrón de movimiento se ha observado en el tiburón ballena en sitios como Arrecife Ningaloo, Australia (Gunn *et al.*, 1999; Wilson *et al.*, 2006). Sin embargo, en el presente estudio no se observaron diferencias significativas entre las proporciones de tiempo que pasaron en los diferentes intervalos de profundidad y temperatura durante el día y la noche. Esto es consistente con lo descrito por Eckert y Stewart (2001), ya que tampoco observaron una relación aparente entre los movimientos verticales y la hora del día en tiburones en el Golfo de California.

Los tiburones presentaron comportamientos significativamente diferentes (K-S, $p < 0.05$) en sus movimientos verticales durante el periodo en el que se encontraron en el Golfo de California. Las diferencias significativas observadas sugieren que el Tiburón del Pacífico mantuvo una mayor actividad en los movimientos verticales. Se observó que el Tiburón del Golfo de California pasó significativamente un mayor periodo de su tiempo en el intervalo de 0-20 m de profundidad. Este comportamiento puede estar relacionado al comportamiento de alimentación. En La Bahía de La Paz se ha observado que el comportamiento de alimentación toma lugar en la superficie, el tiburón ballena presenta un nado lento (menor a un nudo o 1.8 km h^{-1}) y se ha observado que se alimenta en parches superficiales de alta concentración de copépodos (Clark y Nelson, 1997).

En relación a la temperatura, en general se observó que el tiburón del Pacífico experimentó principalmente aguas cálidas entre 30-33 °C y que el tiburón del Golfo de California experimentó aguas ligeramente templadas, principalmente entre 27-30 °C. Sin embargo no se obtuvieron diferencias significativas entre las temperaturas asociadas a sus movimientos verticales. Cabe mencionar, que el tiburón del Pacífico y el del Golfo experimentaron temperaturas tan bajas como 5 y

7.9 °C respectivamente, las cuales son consistentes con las registradas en estudios realizados en el Golfo de California, Belice, Australia, Seychelles y Mozambique (Tabla I). Se sugiere que las temperaturas no limitan los movimientos verticales de los tiburones ballena juveniles de este estudio.

En este estudio las profundidades máximas registradas fueron de 944 y 734.5 m para el Tiburón del Pacífico y el Tiburón del Golfo de California respectivamente. Las cuales son consistentes con las profundidades que registró Graham *et al.* (2006) de >980 m, en Gladden Spit, Belice, Rowat y Gore (2007) de 750-1000 m, en Seychelles y Brunnschweiler (2010) de 1,286 m, en el Canal de Mozambique, África.

Particularmente, el Tiburón del Golfo de California realizó las inmersiones más profundas de todo el seguimiento en la región de Canal de Ballenas. Estas inmersiones pueden estar relacionadas a que en esta región no se observa un mínimo de oxígeno disuelto tan somero como en el resto del golfo, debido a la mezcla de agua influenciada por las intensas corrientes de marea. En el umbral de San Lorenzo el flujo promedio es hacia el norte mientras que en el umbral norte o de Canal de Ballenas es hacia el sur. Esta convergencia en la profundidad es compensada con una divergencia en la superficie, que genera el patrón de una surgencia persistente cuya velocidad vertical promedio es de 5-8 m d⁻¹ (López *et al.*, 2006). La gran mezcla de agua que mantiene las aguas oxigenadas puede explicar el patrón observado en los movimientos verticales del Tiburón del Golfo de California y las bajas temperaturas que experimentó en la región de Canal de Ballenas.

En este estudio se observó que el Tiburón del Golfo de California presentó un patrón en sus movimientos verticales mientras se dirigió al noreste del Golfo de California y estuvo en la zona centro y zona costera, en el cual incrementó la profundidad de sus inmersiones principalmente durante el amanecer. Este patrón

de comportamiento es consistente con el componente espectral con una fuerte periodicidad de 24 h. Esta observación es consistente con la descrita por Graham *et al.* (2006) en un tiburón ballena marcado en Gladden Spit, Belice. Una probable hipótesis que esté explicando los movimientos verticales profundos durante el amanecer, es que estén localizando visualmente la capa de dispersión profunda y presas asociadas al inicio del día (Davis y Stanley, 2002). Esto les permitiría explotar sus presas en la columna de agua durante un breve periodo de vulnerabilidad de las presas.

El patrón particularmente observado de dos componentes espectrales correspondientes a periodicidades de 8 y 2.18 h mientras el tiburón se encontró por tercera ocasión en dirección al noreste, coincide con la de 8 h que observaron Graham *et al.* (2006) en un tiburón ballena en Gladden Spit, Belice. Sin embargo, aún no se encuentra una explicación a este movimiento ya que en ambos estudios no se observó que este patrón esté relacionado a los cambios de luz. No obstante se sugiere que el comportamiento observado en el Golfo de California, esté relacionado a la disponibilidad de alimento, ya que entre este periodo de tiempo las imágenes satelitales demuestran que se presentó una alta productividad biológica.

Por otra parte, se observó que el patrón de movimientos oscilatorios entre los 0-50 m de profundidad, los cuales no estuvieron relacionados a una hora del día, fueron consistentes con lo observado en el espectro de frecuencia donde no se obtuvieron componentes espectrales importantes que indicaran una periodicidad en los movimientos verticales. Este patrón es consistente con el observado por Graham *et al.* (2006) en Gladden Spit, Belice, cuando se presentaba una alta disponibilidad de alimento, no observaron que los tiburones realizaran grandes inmersiones, por el contrario disminuían sus movimientos verticales.

La función de las inmersiones a grandes profundidades del tiburón ballena aún permanece desconocida, ya que no se sabe si hay una variable ambiental de por medio, como la concentración en los parches de zooplancton, o medidas fisiológicas como la temperatura corporal. Se ha sugerido que los tiburones pueden explorar la columna de agua para obtener información sobre la dirección y señales de navegación de los gradientes magnéticos o de las diferentes propiedades químicas que presentan los estratos en relación a la profundidad (Klimley *et al.*, 2002). Otra explicación puede ser que estas inmersiones representen un comportamiento de búsqueda de oportunidades de alimento, Sims *et al.* (2003) sugiere que mediante grandes inmersiones tiburones filtradores como el tiburón peregrino (*C. maximus*) y el tiburón ballena, tienen la oportunidad de alimentarse de comunidades zooplanctónicas de grandes profundidades en los hábitats epipelágicos y mesopelágicos.

En la parte central del Golfo de California los mictófididos son abundantes, durante el día se encuentran a grandes profundidades y durante la noche presentan una migración vertical hacia la superficie (Robinson, 1972). Un estudio sobre contenido estomacal del calamar gigante (*Dosidicus gigas*) en la parte central del Golfo de California indicó que su dieta está compuesta de organismos mesopelágicos y micronectónicos, principalmente de mictófididos (Markaida *et al.*, 2008). Una explicación para los movimientos verticales profundos que realizaron los tiburones ballena bajo estudio en la parte central del Golfo de California, es que pueden estar relacionados al forrajeo de presas mesopelágicas como los mictófididos.

VII. Conclusiones

Los dos tiburones ballena juveniles marcados en Bahía de Los Ángeles presentaron comportamientos diferentes en sus movimientos horizontales hacia el sur, después de salir de la bahía. Mientras uno se trasladó hacia el sur con una dirección continua y saliéndose del golfo, el otro se mantuvo dentro de la región centro-sur del golfo de California. No se encontró alguna variable ambiental o su combinación que pueda explicar este comportamiento, quedando abierta la pregunta de qué es lo que determina estos movimientos.

Los dos tiburones ballena juveniles presentaron diferencias en el comportamiento de sus movimientos verticales mientras se encontraron en el Golfo de California. El tiburón que permaneció más tiempo dentro del Golfo de California presentó un patrón cíclico con una fuerte periodicidad de 24 h en sus movimientos verticales relacionado al amanecer y a regiones profundas. Se sugiere que los patrones observados en los movimientos verticales de los tiburones estuvieron relacionados a la disponibilidad de alimento.

VIII. Referencias

- Álvarez-Borrego, S. 2010. Physical, Chemical, and Biological oceanography of the Gulf of California. En: Richard C. Brusca, Editor. The Gulf of California: biodiversity and Conservation. Chapter 2. The University of Arizona Press.
- Amador-Buenrostro, A., S.J. Serrano Guzmán y M.L. Argote Espinoza. 1991. Modelo numérico de la circulación inducida por el viento en Bahía de Los Angeles, B.C., México. Ciencias Marinas. 17: 39 - 57.
- Beckley, L.A., G. Cliff, M.J. Smale y L.J.V. Compagno. 1997. Recent stranding's and sightings of whale sharks in South Africa. Environmental Biology of Fishes. 50: 343 - 348.
- Block, B.A., D.P. Costa, G. W. Boehlert, and R. E. Kochevar. 2003. Revealing pelagic habitat use: The tagging of Pacific pelagic program. Oceanologica Acta 25:255 – 266.
- Brunnschweiler, J.M., H. Baensch, S.J. Pierce y D.W. Sims. 2009. Deep-diving behavior of a whale shark *Rhincodon typus* during long-distance movement in the western Indian Ocean. Journal of fish biology. 74: 706 - 14.
- Carey, F.G. y J.V. Scharold. 1990. Movements of blue sharks (*Prionace glauca*) in depth and course. Marine biology. 106: 329 - 342.
- Cárdenas-Torres, N., Enríquez-Andrade, R. y Rodríguez-Dowdell, N. 2007. Community-based management through ecotourism in Bahia de los Angeles, Mexico. Fisheries Research. 84: 114 - 118.
- Clark, E. y D.R. Nelson. 1997. Young whale sharks, *Rhincodon typus*, feeding on a copepod bloom near La Paz, Mexico. Environmental Biology of Fishes. 50: 63 – 73.
- Cliff, G., M.D. Anderson-Reade, A.P. Aitken, G.E. Charter, V.M. Peddemors. 2007. Aerial census of whale sharks (*Rhincodon typus*) on the northern KwaZulu-Natal coast, South Africa. Fisheries Research. 84: 41 – 46.
- Colman, J.G. 1997. A review of the biology and ecology of the whale shark. Journal of Fish Biology. 51: 1219 - 1234.

- Compagno, L.J.V. 2002. FAO Species Catalogue for Fishery Purposes No. 1. Sharks of the world. An annotated and illustrated catalogue of shark species known to date. Volume 2. Bullhead, mackerel and carpet sharks (Heterodontiformes, Lamniformes and Orectolobiformes). FAO, Rome. 269 pp.
- Davis T.L.O y Stanley C.A. 2002. Vertical and horizontal movements of southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*) in the Great Australian Bight observed with ultrasonic telemetry. *Fishery Bulletin*. 100:448–465
- Dobson, J. 2008. Part I, 3. Shark! A new frontier in Tourist Demand for Marine Wildlife. En: James Higham y Michael Lück eds. *Marine Wildlife and tourism management: Insights from the natural and social sciences*. CABI, Wallingford.
- D.O.F. (Diario Oficial de la Federación) 2007. DECRETO por el que se declara área natural protegida, con la categoría de reserva de la biosfera, la zona marina conocida como Bahía de los Ángeles, canales de Ballena y de Salsipuedes, comprendiendo la zona federal marítimo terrestre correspondiente a la porción de la costa oriental de la península de Baja California, ubicada frente al Municipio de Ensenada, en el Estado de Baja California. Publicada el Martes 5 de junio de 2007.
- Eckert, S.A. y Stewart, B.S. 2001. Telemetry and satellite tracking of whale sharks, *Rhincodon typus*, in the Sea of Cortez, Mexico, and the North Pacific Ocean. *Environmental Biology of Fishes*. 60: 299-308
- Eckert, S.A., L.L. Dolar, G.L. Kooyman, W. Perrin y R.A. Rahman. 2002. Movements of whale sharks (*Rhincodon typus*) in South-east Asian waters as determined by satellite telemetry. *Journal of Zoology, London*. 257: 111-115.
- Enríquez-Andrade, R., N. Rodríguez-Dowdell, A. Zavala-González, N. Cárdenas-Torres., A. Vázquez-Haikin y C. Godínez-Reyes. 2003. Informe Técnico del proyecto Conservación y aprovechamiento sustentable del tiburón ballena a través del ecoturismo en Bahía de Los Ángeles, Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Dirección Regional en Baja California del Área de Protección de Flora y Fauna Islas del Golfo de California, 67pp.
- Folt, C.L. y C.W. Burns. 1999. Biological drivers of zooplankton patchiness. *Trends in Ecology and Evolution*. 14: 300-305.
- Gifford, A., L.J.V. Compagno, M. Levine y A. Antoniou. 2007. Satellite tracking of whale sharks using tethered tags. *Fisheries Research*. 84: 17-24.

- Graham, R. T., Callum M. Roberts and J.C.R. Smart. 2006. Diving behaviour of whale sharks in relation to a predictable food pulse. 2006. *Journal of the Royal Society*. 3: 109-116.
- Gunn, J. S., J. D. Stevens, T.L.O. Davis y B.M. Norman. 1999. Observations on the short-term movements and behavior of whale sharks (*Rhincodon typus*) at Ningaloo Reef, Western Australia. *Marine Biology*. 135: 553-559.
- Hammerschlag, N., A.J. Gallagher y D.M. Lazarre. 2011. A review of shark satellite tagging studies. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. doi: 10.1016/j.jembe.2010.12.012
- Heyman, W.D., R.T. Graham, B. Kjerfve y R.E. Johannes. 2001. Whale sharks *Rhincodon typus* aggregate to feed on fish spawn in Belize. *Marine Ecology Progress Series*. 215. 275–282.
- Hsu, H.H., S.J. Joung, Y.Y. Liao y K.M. Liu. 2007. Satellite tracking of juvenile whale sharks, *Rhincodon typus*, in the Northwestern Pacific. *Fisheries Research*. 84: 25-31.
- Jonahson, M. y S. Harding. 2007. Occurrence of whale sharks (*Rhincodon typus*) in Madagascar. *Fisheries Research*. 84: 132 – 135.
- Klimley, A.P., S.C. Beavers, T.H. Curtis y J.H. Jorgensen. 2002. Movements and swimming behavior of three species of sharks in La Jolla Canyon, California. *Environmental Biology of Fishes*. 63, 117-135.
- Kohler, N.E. y P.A. Turner. 2001. Shark tagging: a review of conventional methods and studies. *Environmental Biology of Fishes*. 60: 191 – 223.
- López, M., J. Candela y M.L. Argote. 2006. Why does the Ballenas Channel have the coldest SST in the Gulf of California?. *Geophysical Research Letters*. 33: L11603. doi:10.1029/2006GL025908
- Lynn, P.A. 1973. An introduction to the analysis and processing of signals. Pp. 222. New York: Wiley.
- Markaida, U., W.F. Gilly, C.A. Salinas-Zavala, R. Rosas-Luis y J.A.T. Booth. 2008. Food and feeding in the Gulf of California. *CalCOFI Rep*. 49: 90-103
- Martin, R.A. 2007. A review of behavioral ecology of whale sharks (*Rhincodon typus*). *Fisheries Research*, 84: 10-16.
- Meekan M.G., C.J.A. Bradshaw, M. Press, C. McLean, A. Richards, S. Quasnicka y Taylor JG. 2006. Population size and structure of whale sharks

(*Rhincodon typus*) at Ningaloo Reef, Western Australia. Marine Ecology Progress Series. 319:275-285

- Montgomery, J.C. y M.M. Walker. 2001. Orientation and navigation in elasmobranchs: which way forward?. Environmental Biology of Fishes. 60: 109-116.
- Nelson, J.D. y S.A. Eckert. 2007. Foraging ecology of whale sharks (*Rhincodon typus*) within Bahía de Los Angeles, Baja California Norte, Mexico. Fisheries Research. 84: 47–64.
- NOM-029-PESC-2006. Pesca responsable de tiburones y rayas. Especificaciones para su aprovechamiento. Diario Oficial de la Federación, Miércoles 14 de febrero de 2007. México, D.F.
- NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación. Jueves 30 de diciembre de 2010. México, D.F.
- Norman, B. 2005. *Rhincodon typus*. In: IUCN 2010. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2010.2. <www.iucnredlist.org>.
- Robison, B. H. 1972. Distribution of the midwater fishes of the Gulf of California. Copeia 3: 448–461.
- Rowat, D. y M. Gore. 2007. Regional scale horizontal and local scale vertical movements of whale sharks in the Indian Ocean off Seychelles. Fisheries Research. 84: 32-40.
- Sims, D.W. y V.A. Quayle. 1998. Selecting foraging behaviour of basking sharks on zooplankton in a small-scale front. Nature. 393: 460-464.
- Sims, D.W. 2003. Tractable models for testing theories about natural strategies: foraging behaviour and habitat selection of free ranging sharks. Journal of Fisheries Biology. 63: 53-73.
- Sleeman, J.C., M.G. Meekan, S.G. Wilson, J.J. Polovina, J.D. Stevens, G.S. Boggs y C.J.A. Bradshaw. 2010. To go or not to go with the flow: Environmental influences on whale shark movement patterns. Fisheries Research. 390: 84-98.
- Stat Soft, Inc. 2005. STATISTICA (data analysis software system), version 7.1 www.statsoft.com

- Stevens, J. 2007. Whale shark (*Rhincodon typus*) biology and ecology: A review of the primary literature. *Fisheries Research*. 84: 4-9.
- Taylor, J.G. y A.F. Pearce. 1999. Ningaloo Reef currents: implications for coral spawn dispersal, zooplankton and whale shark abundance. *Journal of the Royal Society of Western Australia*. 82: 57-65.
- White, W.T. y R.D. Cavanagh. 2007. Whale shark landings in Indonesian artisanal shark and ray fisheries. *Fisheries Research*. 84: 128–131.
- Willet, C. S., R.R. Leben y M.F. Lavín. 2006. Eddies and tropical instability waves in the Eastern Tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*. 69: 218-238.
- Wilson, S.G., J.J. Polovina, B.S. Stewart y M.G. Meekan. 2006. Movements of whale sharks (*Rhincodon typus*) tagged at Ningaloo Reef, Western Australia. *Marine Biology*. 148: 1157-1166.
- Zamudio, L., H-E. Hurlburt, E.J. Metzger y C.E. Tiburg 2007. Tropical wave-induced oceanic eddies at Cabo Corrientes and the María Islands, Mexico. *Journal of Geophysical Research*. 112: C050448. doi:10.1029/2006JC004018,